

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Análise de obstruções à radiação solar em contexto urbano**

André Riscado Cristóvão

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Miguel Centeno Brito  
Sara Regina Teixeira Freitas

2016



# Agradecimentos

Parte deste trabalho insere-se no projeto PVCITY PTDC-EMS-ENE/4525/2014 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Ao Professor Doutor Miguel Brito, orientador da dissertação, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela sua ajuda, disponibilidade e boa disposição nas reuniões durante estes longos meses.

À minha coorientadora Sara Freitas, pelos esclarecimentos, incentivos, confiança no meu trabalho e acessibilidade demonstrada ao longo destes meses, incluindo reuniões de Skype quando se encontrava fora do país.

À minha família pelo constante apoio, valores e dedicação incondicional, que fizeram com que sempre tivesse ao meu dispor todas as oportunidades e ferramentas necessárias para atingir com sucesso as metas com que me deparei ao longo de todos os meus anos de vida. Um muito obrigado vai ser sempre pouco, meu Pai, minha Mãe e minha Irmã!

Um enorme obrigado à minha namorada, que me acompanhou incansavelmente não só ao longo deste trabalho mas sim desde que iniciei a minha vida académica. Presente nos momentos de imensa alegria mas também nos de frustração, inclusive em noites de trabalho que não lhe pertenciam. Obrigado pela paciência, carinho e pelos conselhos de alguém que é uma constante força positiva no meu dia-a-dia.

Aos amigos que fiz ao longo deste meu percurso académico, onde os bons momentos e gargalhadas irão ser sempre recordados com muito carinho. Um especial obrigado ao João, Dário, Rita e João pelas memórias que sem dúvida vão trazer muita nostalgia e saudade.



# Resumo

A tecnologia fotovoltaica em meio urbano está a tornar-se cada vez mais comum como forma de atingir a sustentabilidade energética em cidades, caracterizadas por serem locais de forte consumo energético. De forma a ser estimado o potencial solar em todos os pontos de um edifício, distrito ou mesmo de uma área metropolitana inteira, os elementos que possam obstruir o céu devem ser tidos em conta, tanto para a componente direta da radiação solar como para a difusa. O objetivo desta tese é efetuar uma comparação de três metodologias referenciadas na área das estimativas do *Sky View Factor*, em meio urbano, selecionando os métodos mais económico-eficientes para estudos em grande escala.

A abordagem consiste em desenvolver três metodologias utilizando: 1) método fotográfico *fisheye* que captura todos os obstáculos na envolvente dos locais onde são feitos os levantamentos fotográficos; 2) um recetor GPS que contabiliza os satélites visíveis bem como a intensidade dos seus sinais que permitem estimativas de SVF; 3) informação LiDAR que permite uma modelação topográfica da cidade para posteriormente serem calculados valores de *Sky View Factor*, recorrendo a um método de *raytracing* utilizando divisões hemisféricas bem definidas.

Os resultados apontam para, após uma comparação com o método fotográfico, uma sobrestimação do *Sky View Factor* na ordem dos 4% por parte do método LiDAR, quando o nível de obstrução é baixo. Contudo, os mesmos apresentam diferenças de 11 e 20% em locais menos amplos, tais como pátios ou ruas ladeadas por edifícios altos, acentuando desta forma limitações habitualmente associadas aos levantamentos LiDAR aquando da representação de vegetação e edificações de formas complexas. Quanto ao método GPS, foi verificada uma correlação entre o índice intensidade de sinal/número de satélites disponíveis e os valores de *Sky View Factor*, embora seja perceptível uma variabilidade do mesmo ao longo do dia, relacionada com efeitos de reflexão.

As conclusões destacam que apesar das aproximações GPS se revelarem pouco precisas, podem representar uma boa abordagem quando é alcançado um compromisso entre precisão, tempo de processamento e economia de recursos.

**Palavras-chave:** fotovoltaico em meio urbano, *Sky View Factor*, método fotográfico *fisheye*, LiDAR, GPS



# Abstract

Urban Photovoltaics is becoming trendy as a means to achieve energetic sustainability in cities, where a significant amount of electricity is consumed. In order to estimate the solar potential in all points of a building, district or the whole metropolitan region, the elements that might obstruct the sky must be taken into account for both direct and diffuse components of solar radiation. The aim of this thesis is to compare three state-of-the-art methodologies for Sky View Factor estimation in urban environments, selecting the more cost-effective methods for large scale assessments.

The approach consists on developing three methodologies using: 1) a fisheye photographic method to capture every obstacle in the surroundings of several shooting places, undergoing pixel identification and image treatment to obtain a reliable Sky View Factor value; 2) a GPS receiver accounting for satellite visibility and signal intensity that allow Sky View Factor predictions; and 3) LiDAR data to model the city topography which is then used to calculate Sky View Factor values by a raytracing method with a detailed sky dome division.

The results show that, in comparison with the photographic method, the LiDAR method overestimates the Sky View Factor in around 4% when the level of horizon obstruction is low. Yet, they reveal differences of up to 11% and 20% in narrower spaces such as courtyards and canyons with tall buildings, which are attributed to the limitation of LiDAR representation of vegetation and complex shaped features. As for the GPS method the signal intensity/number of visible satellites index reveals a correlation to the Sky View Factor values but features a certain level of variation throughout the day, attributed to reflection effects.

The conclusions highlight that although GPS approximation results are less accurate a decent Sky View Factor estimation may represent a good method when there is a trade-off between accuracy, execution time and economy of resources.

Keywords: Urban Photovoltaics, Sky View Factor, fisheye photographic method, LiDAR, GPS





# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento Geral .....	1
1.2	Objetivos .....	4
2.	Revisão de literatura .....	5
2.1	Método Fotográfico <i>Fisheye</i> .....	5
2.1.1	SunEye210 Shade Tool .....	7
2.1.2	Imagens <i>fisheye</i> térmicas .....	8
2.2	Métodos Manuais .....	9
2.2.1	Solar Pathfinder.....	10
2.2.2	Panorama Master.....	11
2.3	GPS .....	13
2.3.1	Estimativas do SVF via recetores GPS .....	13
2.4	Modelos Digitais de Superfície (MDS).....	15
2.4.1	Cálculo do SVF através de modelo digital de edifícios 3D.....	15
2.4.2	<i>Raytracing</i> com MDS .....	17
2.4.3	SVF através de modelo digital de edifícios e vegetação .....	20
3.	Metodologia .....	25
3.1	Local de estudo .....	25
3.2	Fotografia <i>fisheye</i> .....	27
3.2.1	Equipamento .....	27
3.2.2	Aquisição e tratamento de dados .....	28
3.3	Recetores GPS .....	34
3.3.1	Equipamento .....	34
3.3.2	Aquisição e tratamento de dados .....	34
3.4	<i>Raytracing</i> com MDS.....	37
4.	Resultados e Discussão .....	41
4.1	<i>Fisheye</i> vs GPS .....	41
4.2	<i>Fisheye</i> vs <i>Raytracing</i> com MDS.....	45
5.	Conclusão .....	49
6.	Referências .....	51
7.	Anexos .....	55
	<b>Anexo A</b> <i>Features</i> dos dispositivos portáteis de cálculo de acesso solar .....	55
	<b>Anexo B</b> Screenshots do SkyViewFactorCalculator para os 13 locais analisados.....	57
	<b>Anexo C</b> – Locais no campus da FCUL onde as metodologias foram aplicadas .....	59



# Índice de Figuras

Figura 1 – Consumo de energia elétrica em Portugal por setor de atividade (PORDATA, 2016).	1
Figura 2 – Irradiação média anual nos países europeus (PVGIS, 2012).	2
Figura 3 – Distinção de SVF em local perfeitamente desobstruído (esquerda) e local obstruído (direita) (Wypych & Bokwa, 2013).	3
Figura 4 – Janela de comandos do software SkyViewFactorCalculator: a) importação da imagem fisheye e definição do centro, raio e limites da imagem, e b) após processamento e divisão de pixels de obstrução/céu limpo (Lindberg & Holmer, 2010).	6
Figura 5 – a) Dispositivo SunEye210 Shade Tool e b) visualização do ecrã aquando de uma análise ao acesso solar local (Solmetric, 2015).	8
Figura 6 – Exemplo de fotografia fisheye térmica em condições de: a) céu limpo, b) imagem binária em condições de céu limpo, c) céu nublado, e d) imagem binária em condições de céu nublado (Chapman L. , Thornes, Muller, & Mcmurdoch, 2007).	9
Figura 7 – a) Dispositivo Solar Pathfinder completo e b) respectiva secção de instrumentos com a cúpula hemiférica polida sobreposta (direita) (Solar Pathfinder, 2015).	10
Figura 8 – Diagrama solar do dispositivo Solar Pathfinder, com indicação de latitude específica e percentagem de acesso solar mensal (Solar Pathfinder, 2015).	11
Figura 9 – Panorama Master, fixador de máquina fotográfica (The Solar Design Company, 2011).	12
Figura 10 – Fotografia panorâmica conseguida com Panorama Master depois de importada para o software HorizON (The Solar Design Company, 2011).	12
Figura 11 – a) Fotografia circular fisheye, b) display exemplificativo do ecrã GPS e de como é feita a definição dos satélites visíveis, e respetiva intensidade do sinal, no local da fotografia a) (Chapman, Thornes, & Bradley, 2002).	14
Figura 12 – MDS gerado pelo VirtualGIS (Unger, 2009).	15
Figura 13 – a) Polígono $g(x)$ a delinear a fronteira entre céu visível e obstruções, b) secção (S) de largura igual ao ângulo de rotação $\alpha$ e altura $\beta$ (Gal, Rzepa, Gromek, & Unger, 2007).	16
Figura 14 – Mapeamento do SVF no solo e telhados do campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, através do algoritmo SOL.	18
Figura 15 – SVF é o rácio entre a área de céu aberto e a área total hemisférica (Brasebin, Perret, Mustière, & Weber, 2012).	19
Figura 16 – Mapeamento do SVF nas fachadas do campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, através do algoritmo SOL.	20

Figura 17 – Base de dados de edifícios e vegetação colorida consoante elevação de cada elemento (Gál & Unger, 2014). .....	21
Figura 18 – a) ângulos de elevação de diferentes elementos em determinada direção, b) polígonos marcados no hemisférios correspondentes a um edifício (B) e dois tipos de árvores ( $T_1$ e $T_2$ ) (Gál & Unger, 2014). .....	22
Figura 19 – Histograma de SVF calculados a) sem copas das árvores, b) com copas das árvores (Gál & Unger, 2014).....	23
Figura 20 – Locais selecionados para a implementação das metodologias em foco, no campus da FCUL. Locais 1, 3 e 4 representantes de fachadas. ....	26
Figura 21 – Diversidade de elementos presentes ao longo dos 13 locais analisados.....	26
Figura 22 – a) Câmara digital Olympus SP-350 com anel adaptador e conversor fisheye, b) conversor fisheye Nikon FC-E8 e indicação do campo de visão proporcionado. ....	27
Figura 23 – Representação de uma projeção polar equidistante (wiki.naturalfrequency, 1994). .....	28
Figura 24 – Etapas de cálculo do SVF através do IDRISI (Holmer, Postgard, & Eriksson, 2001). ..	29
Figura 25 – Exemplo de ensaios fotográficos com a lente fisheye no a) local 5 (ponto central de um pátio, plano horizontal) e b) local 4 (fachada do edifício, plano vertical). ....	31
Figura 26 – Exemplo de sobre-exposição fotográfica e problemas associados: a) fachada com sobre-exposição solar, b) errada identificação de pixeis de céu por parte do software SkyViewFactorCalculator, c) edição fotográfica na fachada crítica, d) correta delineação da zona não obstruída por parte da ferramenta SkyViewFactorCalculator. ....	32
Figura 27 – a) envolvente complexa com diversidade de elementos presentes, b) correta identificação da zona desobstruída. ....	33
Figura 28 – Página web que permite o display da posição das frotas de satélites em tempo real (In-The-Sky.org, 2016). .....	35
Figura 29 – Gráfico polar representativo da dispersão homogénea de satélites ao longo de um período de dez horas.....	35
Figura 30 – Screenshot do recetor GPS utilizado em presença de: a) alta intensidade de sinal e abundância de satélites disponíveis, b) baixa intensidade de sinal e c) divisão hemisférica de ensaio numa fachada. ....	36
Figura 31 – Processo de localização relativa do SVF de 1 ponto recorrendo aos 8 valores de SVF circundantes. ....	38
Figura 32 – Diferentes modelos de divisão hemisférica considerados : a) 145, b) 290, c) 400 e d) 1081 pontos. ....	39
Figura 33 – Dispersão de satélites ao longo de dez horas no local a) 6 e b) local 13. ....	41

Figura 34 – Boxplots ilustrativos do índice $(SSI/N)_{norm}$ e comparação com valores SVF fisheye (linha verde) com recurso: a) exclusivamente à frota GPS e b) com recurso a GPS+GLONASS..	42
Figura 35 – SVF relativo à abordagem GPS em função do valor SVF Fisheye. ....	43
Figura 36 – Fenómeno de reflexão do sinal GPS dentro de um pátio com envolventes altas....	44
Figura 37 – Comparação dos valores SVF fisheye, conseguidos através dos métodos de pixel e anéis concêntricos, com os valores SVF do algoritmo SOL, recorrendo às 4 divisões hemisféricas do método de raytracing segundo dados LiDAR.....	45
Figura 38 – SVF relativo ao algoritmo SOL (método de raytracing) em função do valor SVF Fisheye.....	46
Figura 39 – Locais a) 2, b) 4 e c) 5 dos 13 fotografados. ....	47
Figura 40 – Erro percentual relativo do a) algoritmo SOL (4 divisões hemisféricas), b) método GPS, face aos valores referência SVF Fisheye. ....	48



# Acrónimos

DOP	Dilution of Precision
eATE	enhanced Automatic Terrain Extraction
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Sistema de Posicionamento Global
LiDAR	Light Detection And Ranging
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
LPS	Leica Photogrammetric Suit
MDS	Modelo Digital de Superfície
MED	Modelo de Elevação Digital
N	Número de satélites visíveis
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NZEB	Net Zero Energy Building
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PGM	Portable Gray Map
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SSI	Satellite Status Index, referido nesta dissertação como intensidade do sinal
SVF	Sky View Factor
TCM	Tree-Crown Mapping Tool
UE	União Europeia
UHI	Urban Heat Island
VF	View Factor





# Simbologia e Notações

$\alpha$	Ângulo de rotação
$\beta$	Ângulo de elevação
$\gamma$	Incremento de altitude ao ângulo de elevação do edifício
$\delta$	Ângulo zenital
$T$	Transparência
$a$	Coeficiente relativo ao ângulo de incidência do sol
$b$	Coeficiente relativo ao ângulo de incidência da superfície
$B$	Edifício com maior ângulo de elevação numa dada direção
$F_1$	Coeficiente circumsolar
$F_2$	Coeficiente do brilho do horizonte
$FV$	Fator de Visão
$I_{dH}$	Radiação difusa
$n$	Número de divisões do círculo hemisférico
$N$	Número de satélites visíveis
$p_i$	Número de pixéis correspondentes ao céu
$SSI$	<i>Satellite Status Index</i>
$SVF$	<i>Sky View Factor</i>
$T_1$	Árvore com maior ângulo de elevação na mesma direção do edifício
$T_2$	Árvore com maior ângulo zenital na mesma direção do edifício
$t_i$	Número de total de pixéis existentes



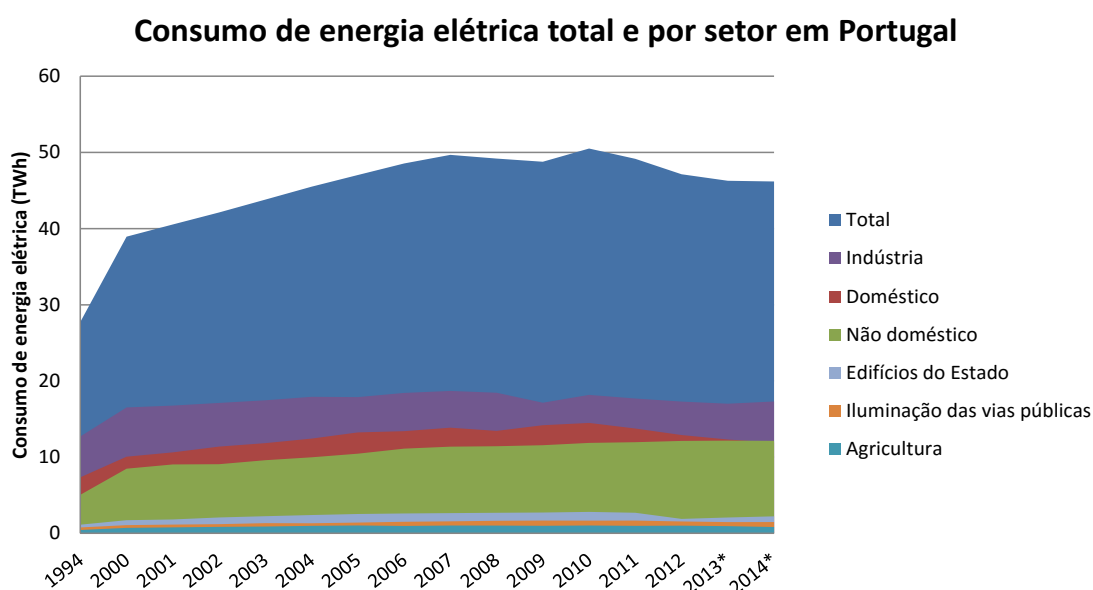
# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento Geral

O constante crescimento populacional a que se assistiu nas últimas décadas, assim como o desenvolvimento tecnológico que o sustenta, tem como consequência um aumento das necessidades energéticas a nível mundial. Esse crescimento do consumo foi em grande parte sustentado pelo fácil acesso, extração e comercialização de formas de energia com grande poder calorífico, como é o caso do petróleo. Previsões realizadas com foco no período entre 2012 e 2040 apontam para um crescimento no consumo mundial de energia na ordem dos 48%, sendo que a maior parcela desse mesmo aumento tem como responsáveis países não membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) (EIA, 2016). Contudo, o uso intensivo dos recursos não renováveis sofreu um abrandamento no que aos países mais avançados tecnologicamente diz respeito, uma vez que a consciencialização ambiental e energética toma maior força nos mesmos. Um exemplo disso mesmo foram os compromissos assumidos pelos países pertencentes à UE (União Europeia) face à estratégia energética e climática com horizonte em 2020, onde em 2007 os líderes europeus definiram as seguintes metas, apenas impostas nas legislações em 2009 (EU, 2016):

- 20% (no mínimo) de redução nas emissões de GEE (Gases de Efeito de Estufa) (face aos níveis de 1990);
- 20% da energia consumida pelos países da UE ter origem renovável;
- 20% de redução no consumo tendo por base medidas de eficiência energética.

Um pouco por toda a Europa foram levadas a cabo intervenções cuja intenção visava o cumprimento das metas impostas, e Portugal, como membro integrante da UE, não se desviou desse mesmo trajeto. Em função das reformas políticas que estrategicamente foram implementadas com vista aos propósitos definidos, pode notar-se na Figura 1 a efetiva redução do consumo elétrico em Portugal, que depois de um máximo atingido em 2010 sofreu um decréscimo assinalável, presumivelmente devido à crise económica mundial de 2008, mas também fruto de políticas de eficiência energética no setor doméstico, como se supõe através da Figura 1.



\*Valores previstos

Figura 1 – Consumo de energia elétrica em Portugal por setor de atividade (PORDATA, 2016).

De forma a alcançar uma concreta mudança no paradigma energético, contribuindo para diminuir a dependência energética, reduzir as emissões de GEE e fomentar um *mix* energético mais sustentável, foi necessário aceitar e acima de tudo estimular o potencial renovável que o país possui. Em 2014 a produção renovável contribuiu com 62% do consumo elétrico nacional, descendo em 2015 essa parcela para os 47% (REN, 2015), cimentando desta forma a sua reconhecida importância na produção nacional. Relativamente ao potencial solar, Portugal destaca-se como um dos países com os mais altos níveis de irradiação no continente europeu, Figura 2.

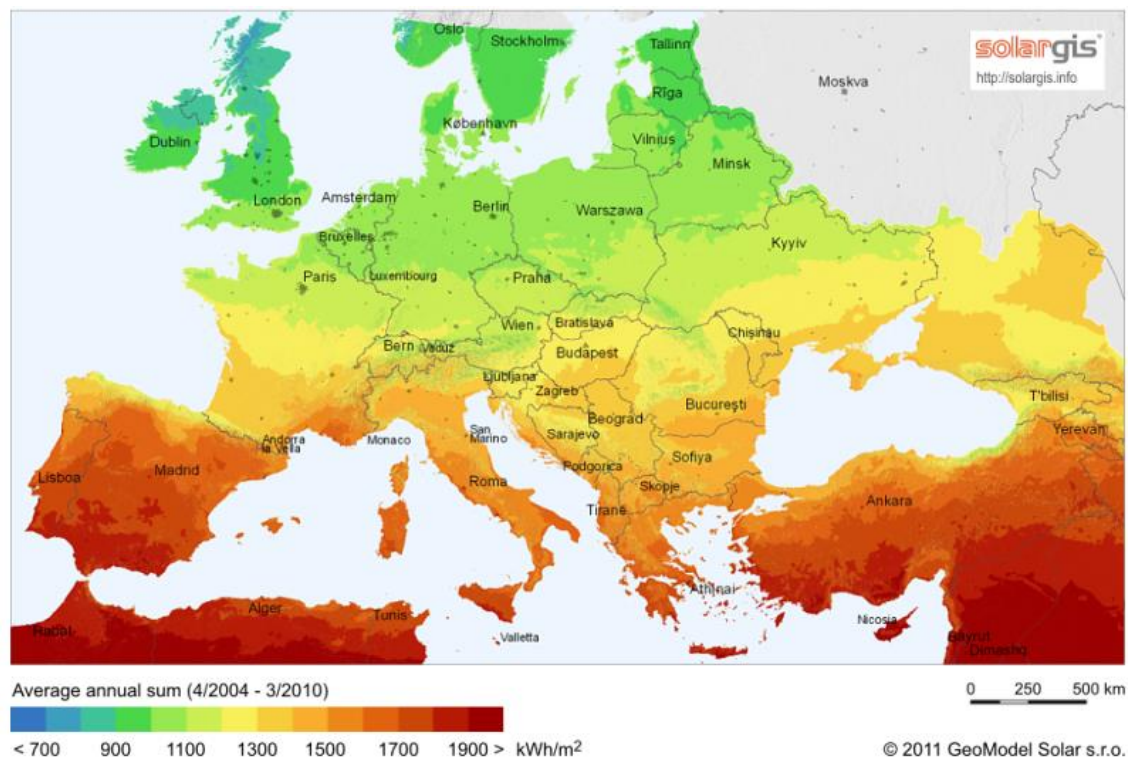


Figura 2 – Irradiação média anual nos países europeus (PVGIS, 2012).

Face ao potencial que o nosso território revela, a exploração da tecnologia fotovoltaica revela-se não só como uma hipótese promissora mas acima de tudo lógica face a todo o recurso disponível. Embora as instalações convencionais desta tecnologia se encontrem distanciadas dos centros urbanos, onde são construídas instalações de grande dimensão e capacidade, nos últimos anos tem-se assistido a uma preocupação de aproximar o local de produção da energia do próprio local de consumo. A produção descentralizada surge assim como uma solução aliciente para dar resposta a esta questão, promovendo a geração de energia renovável num contexto de micro-geração que auxilia consumidores particulares ou empresas a produzir a sua própria energia, dando vida ao conceito de edifícios auto-sustentáveis. Estes, habitualmente apelidados de NZEB (Net Zero Energy Building), são caracterizados pela sua produção de energia igualar os seus consumos, sendo o edifício Solar XXI do LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) um exemplo desta visão. A UE tem como ambição que a partir de 2020 os novos edifícios a construir partilhem desta capacidade, e neste sentido são cada vez mais vulgares as construções em meio urbano que integram soluções renováveis, nomeadamente aplicações fotovoltaicas tanto nos telhados como também nas próprias fachadas dos edifícios.

A garantia de uma exploração maximizada desta fonte de energia, evitando perdas associadas a sombreamento, passa pelo ideal posicionamento da instalação em si, sendo o mesmo diretamente influenciado pelas obstruções, ou seja, pelo formato dos edifícios e vegetação

envolventes. Os painéis fotovoltaicos são caracterizados por uma desproporcionalidade entre a área do painel sombreada e a perda de produção daí associada, fruto do modo como as ligações entre as células são feitas. Segundo Nguyen et al. (2008), num *array* composto por 100 células solares, caso apenas 6 delas estejam sombreadas, em outras tantas colunas, verificaram-se perdas de produção de cerca de 48%, enquanto se as mesmas 6 células se dividissem por apenas 3 colunas, as perdas iriam rondar os 17%. Assim do ponto de vista do bom planeamento de instalações solares e do próprio arranjo urbano, surge a necessidade de introduzir o conceito de fração de céu visível, que por conveniência será chamado pelo seu termo anglo-saxónico nesta dissertação: *sky view factor* (SVF).

Define-se SVF como o rácio entre a radiação recebida (ou emitida) por uma superfície plana face à radiação emitida (ou recebida) por todo o hemisfério radiante (Watson & Johnson, 1987). É um valor adimensional que distingue um local totalmente coberto de um totalmente descoberto, representado numa escala de 0 a 1, respetivamente (Figura 3).

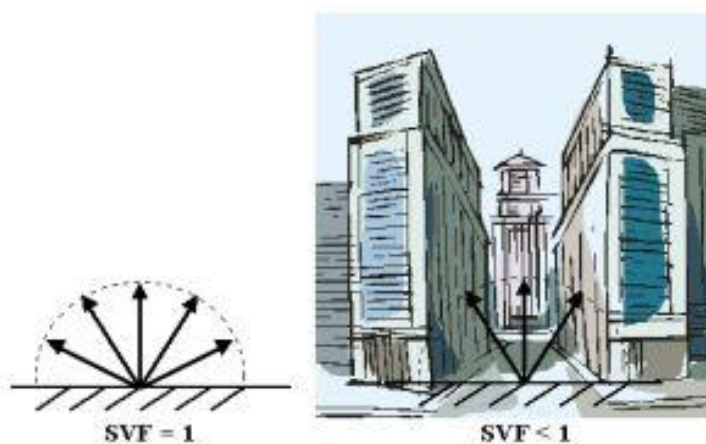


Figura 3 – Distinção de SVF em local perfeitamente desobstruído (esquerda) e local obstruído (direita) (Wypych & Bokwa, 2013).

Além do SVF ser um parâmetro importante no estudo da radiação para sistemas fotovoltaicos, é também muito relevante no que diz respeito aos balanços energéticos de uma cidade, nomeadamente no fenómeno de ilha de calor urbano, ou seja, *urban heat island* (UHI). Este efeito consiste num aumento de temperatura urbana face à temperatura sentida nos seus arredores, em consequência de uma maior densidade de edificado nas cidades. Este processo acentua-se especialmente no período noturno, quando o calor armazenado nos edifícios ao longo do dia é libertado para o exterior, mas que devido à discrepância entre a altura do edificado e a largura das ruas que caracterizam as grandes cidades (baixo SVF abaixo do nível dos telhados), não chega a ser totalmente dissipado para a atmosfera. A título exemplificativo, pode falar-se das reflexões de radiação infravermelha que ocorrem entre as estradas e as fachadas dos edifícios, e que quanto mais altos forem os mesmos face à largura da estrada, mais radiação fica sequestrada. Desta forma, o SVF fornece uma medida de área de céu disponível para as trocas radiativas, como foi estudado em Unger (2004). Assim como pode ser utilizado para parametrizar as trocas radiativas no exterior, o SVF pode ser também válido para a situação análoga que se dá dentro dos edifícios, onde a porção de céu disponível vista dos envidraçados de uma fachada influencia diretamente os ganhos solares do edifício, e consequentemente, a temperatura e necessidades energéticas do seu interior. Com isto, o SVF pode possuir novamente um papel de destaque no âmbito das modelações de cargas de

climatização e, consequentemente, ser um fator a ter em conta no setor das auditorias energéticas.

Retomando a sua aplicabilidade no estudo da radiação solar, o SVF adquire relevância na avaliação do potencial fotovoltaico urbano, uma vez que permite caracterizar a porção de céu visível a partir de um ponto numa superfície face a toda a envolvente hemisférica. Esta tarefa pode revelar-se bastante difícil considerando a diversidade de elementos e distintas morfologias de edifícios presentes numa cidade moderna. No contexto da estimativa da radiação solar que chega à superfície, nomeadamente da componente difusa, existem diversos modelos de radiação solar com diferente grau de complexidade que fazem uso do parâmetro SVF (Yoon, Yun, Jeon, & Kim, 2014). O mais simples é o modelo Liu & Jordan (1963), equação ( 1 ), que considera a radiação difusa como isotrópica (i.e. contribuições iguais de todo o hemisfério):

$$I = I_{DN} \cos i + I_{dH} SVF + I_{GH} \rho GVF \quad (1)$$

com a fração correspondente à radiação difusa,  $I_{dH}$ , a não promover qualquer limitação ao parâmetro SVF. Por outro lado, o modelo mais utilizado é o de Perez et al. (1990), que considera a radiação difusa como anisotrópica e a divide em 3 subcomponentes: componente isotrópica da cúpula hemisférica, parte do brilho circumsolar e a componente relativa ao brilho do horizonte, como se constata na equação ( 2 ):

$$I = I_{DN} \cos i + I_{dH} \left\{ (1 - F_1) SVF + F_1 \left( \frac{a}{b} \right) + F_2 \sin \beta \right\} + I_{GH} \rho GVF \quad (2)$$

onde  $F_1$  é um coeficiente circumsolar,  $F_2$  um coeficiente do brilho do horizonte e  $a$  e  $b$  são coeficientes relativos ao ângulo de incidência do sol e da superfície. Já modelos de grande detalhe, como o explorado em Ivanova (2013), distinguem não só superfícies horizontais de verticais como propõem variantes do SVF. Porém, o estudo de modelos de radiação não está no âmbito desta dissertação.

## 1.2 Objetivos

Na presente dissertação serão consideradas três metodologias de cálculo de SVF com o intuito de descrever o grau de obstrução a nível urbano, com o propósito de uma maior integração da tecnologia fotovoltaica em meio citadino, que se avizinha cada vez mais próxima. O objetivo passa por avaliar diferentes opções simples de determinar o SVF, onde para o efeito foram testadas duas metodologias inovadoras (estimativas via recetores GPS e Modelo Digital de Superfície (MDS) a partir de dados LiDAR (Light Detection and Ranging)) e os resultados comparados com a metodologia padrão, método fotográfico com recurso a lentes *fisheye*.

Ao definir estas metodologias, este estudo estabelece como principais objetivos:

- A verificação da capacidade de detalhe e precisão de abordagens alternativas face ao método *standard* (método fotográfico);
- Proposta de um método económico e fiável para o estudo do SVF em edifícios;
- Identificação das características associadas aos locais propícios à instalação de sistemas fotovoltaicos.

## 2. Revisão de literatura

Dada a importância do parâmetro *Sky View Factor* (SVF) que, como descrito no capítulo anterior, tem uma ampla aplicabilidade em estudos de diferentes vertentes, foi elaborada uma revisão bibliográfica que teve como objetivo categorizar diferentes tipos de metodologia que viabilizam a aquisição do SVF. A divisão foi então feita em 4 grupos: métodos fotográficos, manuais, GPS e métodos que recorrem a MDS.

### 2.1 Método Fotográfico *Fisheye*

A utilização de fotografias *fisheye* como meio de estudo do SVF não é de modo algum uma técnica recente. Este tipo de fotografias é um recurso muito utilizado nesta vertente na medida em que permite uma fotografia que exhibe o horizonte ao longo dos 360°, sendo que numa situação de fotografia vertical, apresenta uma visão nítida de todo o hemisfério e respetivas obstruções. Os cálculos de SVF a partir das mesmas eram inicialmente feitos recorrendo a métodos manuais, onde gráficos de coordenadas polares eram sobrepostos em impressões das fotografias (Steyn, 1980). Estes métodos eram obviamente processos demorados e muito facilmente sujeitos ao erro humano. Com o avanço da tecnologia aliado à necessidade de evolução dos métodos, foi imperativo surgirem novas opções para as análises realizadas nas fotografias, passando por processos mais rápidos e precisos. Com a digitalização tanto das imagens como do próprio processamento, foram criadas ferramentas parcialmente autónomas, ainda que algum controlo tenha de ser praticamente sempre feito.

O cálculo do SVF a partir do método fotográfico, seja qual for a abordagem escolhida, tem por base o conceito da diferença de brilho dos pixéis presentes na fotografia. Depois de retirada a fotografia é necessário um controlo e atribuição de valores aos pixéis, diferenciando-os entre os representativos de céu e obstruções. Contudo, é efetivamente neste passo que reside o maior problema deste método, onde por vezes se torna difícil fazer a distinção entre pixéis referida, seja pela qualidade da imagem não ser a melhor, ou mesmo devido ao brilho semelhante entre pixéis de origem diferente. É então necessário definir um valor ou um intervalo de valores, chamado de *threshold*, que irá servir para limitar a zona da fotografia pertencente ao céu das zonas relativas a obstruções. Ultrapassada essa distinção de pixéis, é habitualmente criada uma imagem apenas com pixéis de cor branca ou preta, onde o SVF é calculado através do rácio entre pixéis correspondentes a céu descoberto (brancos) e os correspondentes a obstruções (pretos).

Sendo que o principal obstáculo à completa automatização deste tipo de processos, na vertente de cálculo do SVF em tempo real, é precisamente a definição do valor de *threshold*, foi em Chapman et al. (2001b) apresentado um algoritmo que elimina a necessidade de controlo por parte do utilizador. No mesmo, assumiu-se que os níveis de luz se mantinham constantes ao longo da captura de todas as fotografias e assim o algoritmo ajusta o contraste de cores da imagem de tal forma que o valor de *threshold* pode ser mantido constante. O algoritmo, que foi escrito na linguagem FORTRAN e calcula o SVF através de imagens no formato PGM (Portable Grey Map), está dividido em dois passos principais: inicialmente atribui novos valores aos pixéis da imagem, e de seguida, aplica o *threshold* para concretizar a delimitação da zona correspondente a céu e obstruções (Chapman & Thornes, 2004). Por fim é

utilizada a equação apresentada por Steyn (1980), que é adaptada de forma a ser aplicada a imagens digitais, como se apresenta na equação (3).

$$SVF = \frac{1}{4n} \sum_{i=1}^n \left[ \sin \frac{\pi(2i-1)}{2n} \right] \left( \frac{p_i}{t_i} 2\pi \right) \quad (3)$$

onde  $n$  é o número de anéis concêntricos em que a imagem irá ser dividida,  $p_i$  é o número de pixéis correspondentes ao céu e  $t_i$  o número de total de pixéis existentes, ambos no anel  $i$ . Este valor é depois multiplicado por  $2\pi$  para se realizar a aproximação à largura angular do céu nos anéis em estudo (Chapman & Thornes, 2004).

O BMSky-View, apresentado em Rzepa & Gromek (2006), é também uma aplicação que permite efetuar o cálculo do SVF a partir de fotografias *fisheye*. Esta ferramenta foi programada em C++ e baseia-se, tal como a anterior, numa modificação ao método apresentado por Steyn (1980). Outra ferramenta apta a fazer o mesmo exercício de cálculo é o *SkyViewFactorCalculator*. Este *software*, desenvolvido em MATLAB e disponibilizado gratuitamente, permite executar o cálculo do SVF facilmente em 5 passos, sem serem necessários quaisquer conhecimentos da linguagem ao programa associada. A Figura 4 ilustra o menu que o utilizador tem acesso desde fase inicial em que se faz o carregamento da imagem alvo, até ao valor final de SVF desejado.

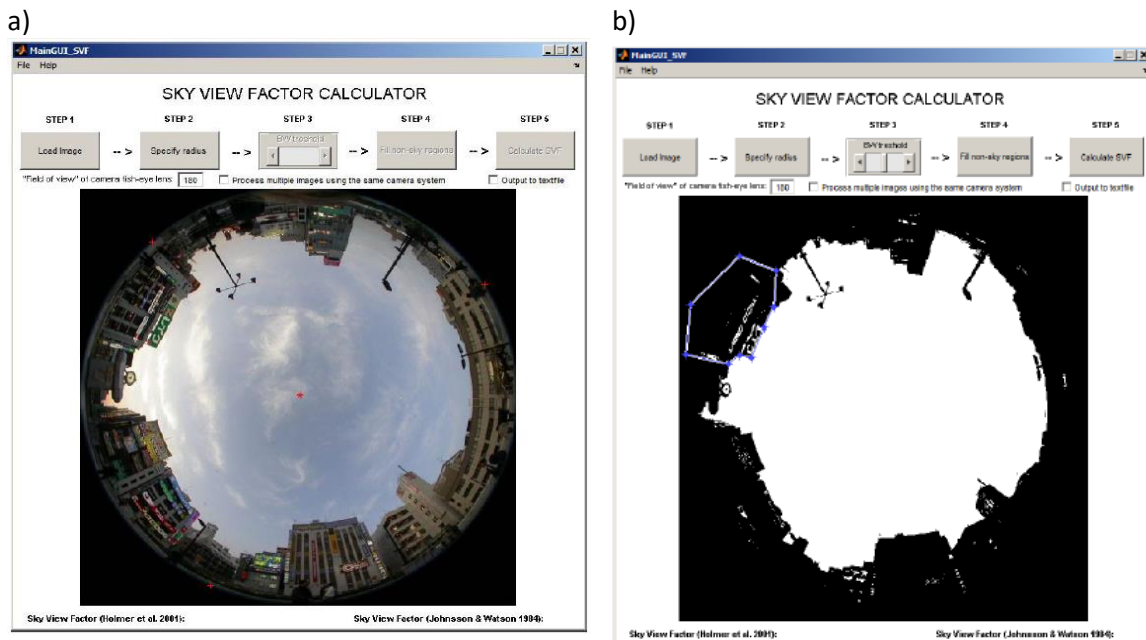


Figura 4 – Janela de comandos do software *SkyViewFactorCalculator*: a) importação da imagem *fisheye* e definição do centro, raio e limites da imagem, e b) após processamento e divisão de pixéis de obstrução/céu limpo (Lindberg & Holmer, 2010).

No passo 1 apenas é necessário fazer o carregamento da imagem que se pretende analisar. O passo 2 exige que se dê informação acerca da área de interesse na fotografia, sendo necessário identificar três pontos no limiar do círculo, marcados com pontos vermelhos na Figura 4 a). No passo 3 é quando se realiza a diferenciação dos pixéis, convertendo a imagem inicial para preto e branco. De seguida, na 4ª fase, é necessário o controlo manual para garantir a correta atribuição de cor aos pixéis. Como se pode entender através da Figura 4 b), o polígono sinaliza alguns pixéis aos quais foram atribuídos valores incorretos, sendo então necessário o preenchimento dos mesmos de forma a garantir que não entram no cálculo final



contabilizados como pixéis representativos do céu. Por fim, no passo 5, é concretizado o cálculo do SVF. Como opções adicionais, o utilizador pode escolher se o resultado é dado na própria janela ou num documento de texto que seria criado como *output* da ferramenta, e também se deseja processar mais do que uma imagem em simultâneo. Uma vez que nem todas as lentes *fisheye* proporcionam obrigatoriamente um campo de visão de 180°, esta ferramenta permite um ajuste neste mesmo detalhe (Lindberg & Holmer, 2010).

O método fotográfico recorrendo a fotografias *fisheye* é amplamente reconhecido como o método com resultados mais exatos no que toca ao cálculo do SVF. A qualidade dos resultados destaca-se na complexidade de um ambiente urbano, que compreende construções das mais variadas dimensões e fisionomias bem como a presença de vegetação. Apesar das boas indicações mencionadas, este método denuncia alguma fraqueza no que toca ao varrimento de grandes áreas, tornando-se lento e difícil. Outra desvantagem relaciona-se com a recolha de imagens quando o céu não se encontra em condições ideais, sendo particularmente sensível quando as fotografias são tiradas em dias de céu limpo, onde o excesso de radiação pode fazer com que alguns edifícios reflitam demasiada radiação, prejudicando a diferenciação dos pixéis por parte dos algoritmos. Ainda assim, em situações em que a precisão seja fundamental, este método apresenta-se como a escolha mais acertada.

### 2.1.1 SunEye210 Shade Tool

O SunEye210 Shade Tool, Figura 5 a), desenvolvido pela empresa SolMetric, é um aparelho portátil com uma aplicabilidade amplamente reconhecida na área da instalação de equipamentos fotovoltaicos. Este dispositivo eletrónico permite fazer avaliações do recurso solar (diário, mensal ou anual), do potencial de produção do local para futuras aplicações fotovoltaicas, apresenta ângulos de obstrução, importa dados meteorológicos a nível mundial, entre outros. Os resultados apresentados têm por base análises aos padrões de obstrução característicos da envolvente do local, permitindo desta forma estimativas mais fiéis e precisas quanto ao seu verdadeiro potencial. O SunEye 210 Shade Tool possui uma câmara *fisheye* digital, que permite a visualização de toda a cúpula hemisférica com uma única fotografia, inclinómetro e bússola eletrónicos, e a possibilidade de GPS integrado. Através da informação relativa à inclinação e localização do aparelho, diagramas solares correspondentes são importados diretamente para o ecrã onde a fotografia é visualizada, permitindo assim uma fácil e rápida perceção por parte do utilizador de onde serão os locais mais e menos afetados pelas obstruções que caracterizam a envolvente, através dos valores de exposição solar visualizados no ecrã, Figura 5 b). Existe também a possibilidade de uma análise em tempo real através de um modo *live survey*, no qual os diagramas solares sofrem uma rotação associada à orientação do dispositivo. Outra das mais-valias deste dispositivo é a sua capacidade de adicionar ou retirar obstruções da imagem captada pela câmara, com o intuito de analisar as alterações que se registam a nível do *output* da futura instalação fotovoltaica. A facilidade com que o aparelho pode ser ligado ao *software* de simulação, para estimativas de produção bem como para o *payback time* representa outra das vantagens deste equipamento (Solmetric, 2015).

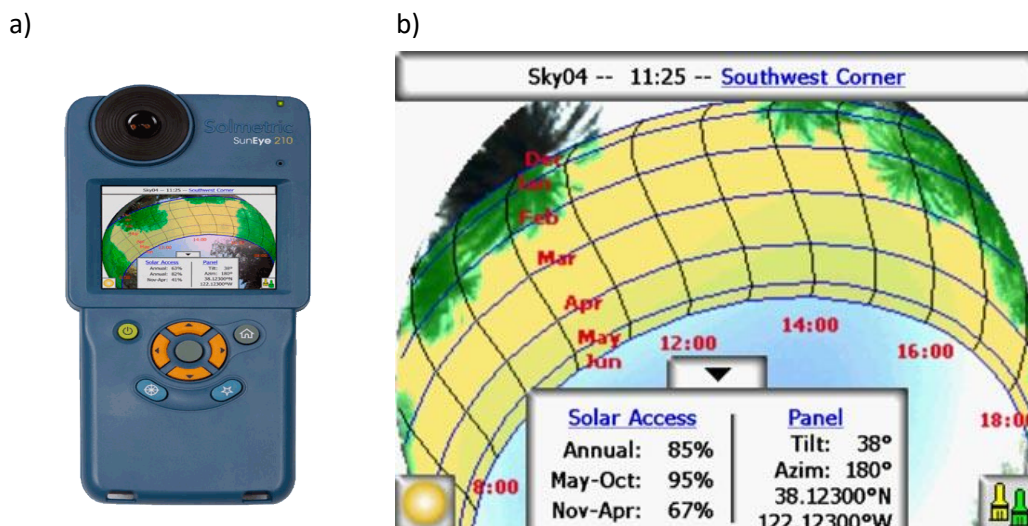


Figura 5 – a) Dispositivo SunEye210 Shade Tool e b) visualização do ecrã aquando de uma análise ao acesso solar local (Solmetric, 2015).

Contudo, ainda que o equipamento consiga reunir as vantagens anteriormente descritas, ao adicionar ao custo do equipamento os valores de aquisição dos *softwares* de simulação compatíveis, como por exemplo o PVSyst, PV\*SOL ou OnGrid, este conjunto fica longe de ser uma opção económica, rondando os 1968€. Apesar do consensual reconhecimento que este dispositivo adquiriu ao longo dos anos, foi descontinuado após a sua empresa criadora ter sido adquirida pela Vivint Solar, segundo maior instalador fotovoltaico a nível residencial nos Estados Unidos (PV magazine - Photovoltaic Markets & Technology, 2016).

### 2.1.2 Imagens *fisheye* térmicas

A captação de imagens *fisheye* térmicas como meio de calcular o SVF é uma abordagem relativamente recente nesta área, surgindo em 2007 um estudo acerca da mesma. Além da típica visibilidade de 180° proporcionada pelas lentes *fisheye*, esta técnica distingue áreas quentes correspondentes a obstruções, das áreas frias, que definem o céu descoberto. As imagens térmicas são tratadas de maneira semelhante às convencionais, passando pelo mesmo processo de conversão da imagem inicial para uma apenas a preto e branco. Contudo, a diferenciação dos pixels de céu dos relativos a obstruções não se apresenta tão acessível como acontece com a captura de fotografias normais. Isto acontece porque a intensidade do brilho apresentado nas fotografias é referente a temperaturas relativas e não absolutas, isto é, a intensidade de um ponto na imagem é influenciada pela intensidade dos pontos que o rodeiam.

Como se pode observar Figura 6 a) e b), os resultados obtidos em dias de céu limpos são bastante satisfatórios, ainda que seja necessário um controlo manual para corrigir alguns pixels, como se observa na parte inferior da Figura 6 b). Já na Figura 6 c), indo de encontro ao problema da exibição de temperaturas relativas, pode ver-se que as nuvens são apresentadas praticamente com a mesma intensidade de brilho que os edifícios presentes na imagem. Desta forma, a conversão da imagem inicial para imagens a preto e branco dá origem a uma divisão de pixels longe do desejável, Figura 6 d).

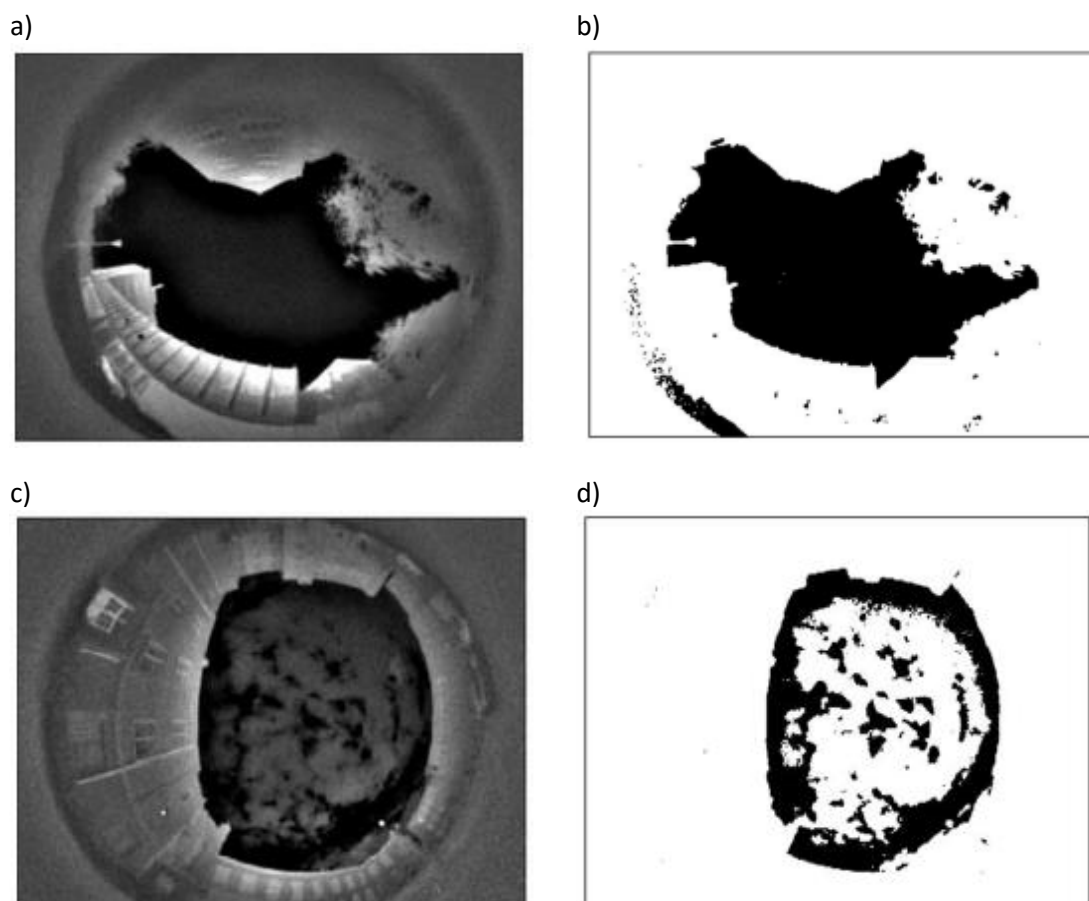


Figura 6 – Exemplo de fotografia fisheye térmica em condições de: a) céu limpo, b) imagem binária em condições de céu limpo, c) céu nublado, e d) imagem binária em condições de céu nublado (Chapman L. , Thornes, Muller, & Mcmurdoch, 2007).

A principal vantagem deste método é a possibilidade de poder ser usado tanto de dia como de noite, sendo que a preferência, quer numa quer noutra situação, é a recolha de imagens em condições de céu limpo. Além da aplicabilidade descrita neste estudo, elaborado com o objetivo do estudo do SVF, esta é uma prática que possibilita a análise de sombreamentos locais provocados por nuvens. Apesar de ainda pouco utilizada, é uma alternativa com potencial face às fotografias tradicionais. Os algoritmos atuais ainda denunciam dificuldades na diferenciação de edifícios e nuvens, como foi referido, mas é um problema que os autores esperam ser ultrapassado com o tempo (Chapman L. , Thornes, Muller, & Mcmurdoch, 2007). Contudo, esta é uma abordagem que não ganhou a notoriedade esperada, possivelmente pela pouca evolução dos algoritmos com ela relacionados, ou também devido à persistência de distorções nas imagens face às conseguidas com as lentes *fisheye* convencionais, que motivavam assim resultados menos exatos.

## 2.2 Métodos Manuais

Os métodos manuais, assim designados neste estudo, recorrem essencialmente a ferramentas portáteis, analógicas ou digitais, que possibilitam a aquisição de dados sobre as envolventes de um ponto de interesse com base em trabalho de campo e pouca automatização. Nos exemplos que se seguem, são apresentados dispositivos que permitem uma recolha de informação

respeitante à envolvente do local, que posteriormente poderá ser importada para *software* de simulação fotovoltaica.

### 2.2.1 Solar Pathfinder

O Solar Pathfinder, criado em 1978 por Bernard McGrew Haines, é um dispositivo não-eletrónico que permite fazer uma análise ao acesso solar local. Este aparelho é composto por três partes distintas: a base, com a opção de ser suportada por um tripé, é colocada num local relativamente bem nivelado; a secção de instrumentos, colocada no topo da base, composta por uma bússola, inclinómetro e por um diagrama solar representativo da média de cada mês; e uma cúpula hemisférica posicionada por cima da secção de instrumentos, ilustrada na Figura 7 a). Para que os ensaios apresentem uma maior fidelidade, alguns acertos devem ser tidos em conta na secção de instrumentos. A própria secção deve ser ajustada, através da sua rotação, até que a bússola aponte para Norte, e nivelada horizontalmente até que o inclinómetro assim o indique. O próprio diagrama solar pode ser também rodado separadamente até que a declinação magnética do local seja atingida, de modo a permitir que o mesmo esteja efetivamente orientado a Sul.

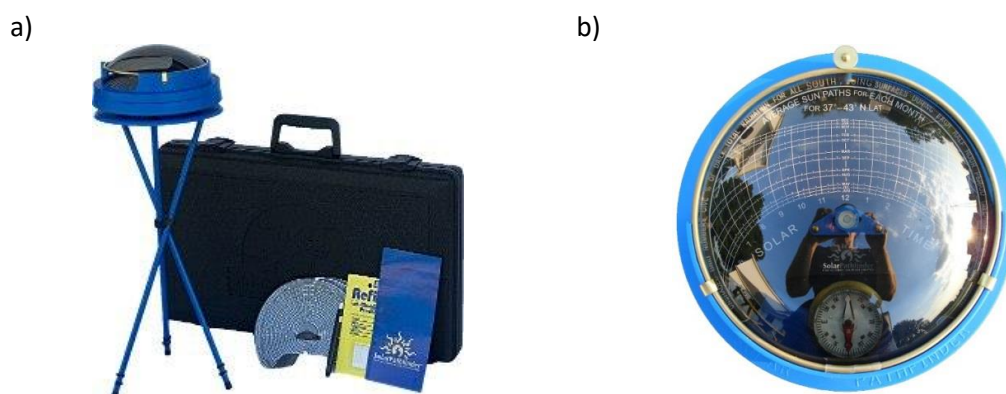


Figura 7 – a) Dispositivo Solar Pathfinder completo e b) respectiva secção de instrumentos com a cúpula hemisférica polida sobreposta (direita) (Solar Pathfinder, 2015).

O conceito, baseado no princípio da refletividade, é bastante simples e é conseguido através da cúpula hemisférica polida, de plástico transparente, onde toda a envolvente do local é visível, Figura 7 b). Por baixo da superfície refletora, encontra-se o diagrama solar associado ao local em estudo, de acordo com a sua latitude, que deve ser cuidadosamente ajustado. De referir que o equipamento inclui diagramas solares distintos: “horizontais”, que devem ser utilizados para aplicações entre 0 e 20 graus de inclinação, e “verticais”, que são os mais adequados a aplicações com inclinação entre 20 a 90 graus. Assim, conjugando em simultâneo as reflexões vistas na superfície da cúpula com o diagrama solar visualizado através da mesma, consegue-se a distinção entre as zonas obstruídas e as zonas perfeitamente descobertas, bem como as horas em que se dão os sombreamentos. Com o auxílio de um marcador fornecido no próprio *kit*, é possível delinear no diagrama solar as zonas afetadas por obstruções de forma a obter um registo do acesso solar do local. Para alcançar a mesma finalidade, pode-se simplesmente fotografar a cúpula hemisférica com as devidas obstruções visíveis. Para ambas as abordagens é sugerido que se mantenha uma distância entre 30 a 50 centímetros da cúpula plástica. O diagrama solar permite ainda estimar a percentagem de radiação mensal que o

local em estudo terá acesso em comparação com o cenário sem obstruções, de acordo com a representação na Figura 8.

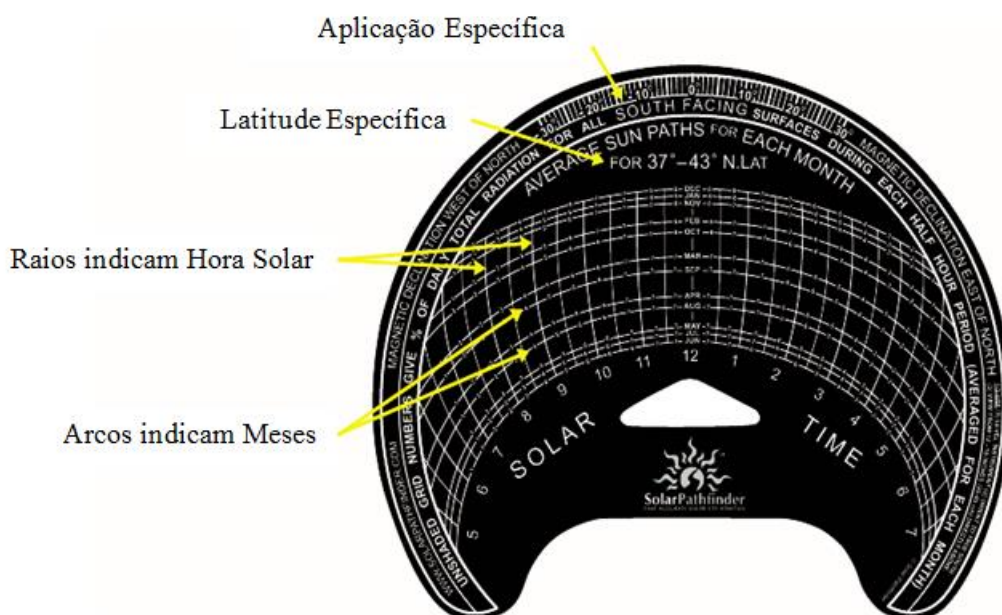


Figura 8 – Diagrama solar do dispositivo Solar Pathfinder, com indicação de latitude específica e percentagem de acesso solar mensal (Solar Pathfinder, 2015).

Com a constante evolução que o mercado deste tipo de ferramentas sofre, a empresa responsável pela exploração do Solar Pathfinder criou o Assistant PV Software, vendido separadamente da primeira unidade, que permite análises adicionais em relação ao uso apenas do dispositivo analógico descrito anteriormente. Este *software*, que tem como inputs principais a fotografia em formato digital da cúpula do Solar Pathfinder bem como as coordenadas do local em estudo, contém bases de dados relativas a diagramas solares e dados meteorológicos a nível mundial, listas de diversas marcas de painéis e inversores, com a possibilidade de inserir novos modelos caso os mesmos não constem na informação já disponibilizada. Quanto aos outputs, permite estimativas de acesso solar com e sem contabilizar as obstruções, gerar relatórios personalizados de acordo com as intenções do cliente, estimar produção a partir de painéis fotovoltaicos, sugerir inclinações e orientações ideais consoante o sombreamento existente, eficiência da instalação, poupanças associadas, entre outras opções. O Solar Pathfinder tem um custo aproximado de 270€, enquanto o *software* ronda os 170€, apresentando-se desta forma como um conjunto bastante competitivo (Solar Pathfinder, 2015).

### 2.2.2 Panorama Master

O Panorama Master apresenta-se como outra opção no âmbito do estudo de sombreamentos. Consiste num fixador para uma câmara digital (Figura 9), habitualmente suportado por um tripé, que tem como função controlar a gradual rotação da câmara de modo a conseguir-se uma fotografia panorâmica.





Figura 9 – Panorama Master, fixador de máquina fotográfica (The Solar Design Company, 2011).

Após a câmara estar devidamente fixada ao aparelho, são retiradas fotografias com intervalos de rotação de  $20^\circ$  entre si até que se tenha fotografado toda a envolvente do local. Com este processo as fotografias estão garantidamente alinhadas sobre o mesmo eixo de rotação e facilmente serão posteriormente unidas, através de métodos computacionais, para a obtenção de uma fotografia panorâmica. A mesma é alcançada recorrendo ao *software* HorizON, desenvolvido especificamente para trabalhar as fotografias conseguidas com o Panorama Master. Permite a junção de todas as fotografias retiradas com a câmara, proporcionando desta forma uma única imagem de  $360^\circ$  de toda a envolvente do local. Depois de alcançada a panorâmica, o programa elabora automaticamente a sobreposição do diagrama solar específico do local em estudo, bem como a linha do horizonte característica, incluindo as obstruções visíveis, como se observa na Figura 10 a cor-de-rosa.



Figura 10 – Fotografia panorâmica conseguida com Panorama Master depois de importada para o *software* HorizON (The Solar Design Company, 2011).

Concluído o tratamento das imagens por parte do *software* mencionado, o output do mesmo é facilmente exportado para outros programas capazes de análises e simulações fotovoltaicas, tal como é exemplo o PV\*SOL. Neste, a partir da disposição das obstruções visíveis na imagem fornecida, podem ser realizadas avaliações ao nível do sombreamento, posicionamento otimizado dos módulos, relatórios técnicos de acordo com as pretensões do cliente, entre outras opções. Assim, o Panorama Master caracteriza-se como um equipamento de fácil transporte e utilização, tendo como mais-valia a sua adaptabilidade a uma vasta gama de máquinas fotográficas bem como a diversos *softwares* de simulação fotovoltaica. No entanto, assumindo a necessidade de recorrer às duas extensões computacionais para um estudo mais aprofundado do potencial local, o conjunto Panorama Master mais os dois *software* rondam os 1 167€, sendo o *software* PV\*SOL o principal responsável pelo incremento do preço (917€). Partindo do princípio que o processo depende da utilização de um tripé, a estabilização da estrutura pode não ser fácil de alcançar em superfícies muito inclinadas (The Solar Design Company, 2011). No Anexo A encontram-se tabeladas as características que cada um dos três

dispositivos de cálculo de acesso solar referidos (SunEye210 Shade Tool, Solar Pathfinder e Panorama Master) dispõe.

## 2.3 GPS

### 2.3.1 Estimativas do SVF via recetores GPS

A tecnologia de GPS foi desenvolvida em 1960 pela NASA e foi concebida para indicar o posicionamento de alta precisão e navegação em tempo real, sob qualquer condição atmosférica. Esta informação é adquirida através da triangulação do tempo e distância recolhidos por uma frota de 24 satélites, distribuídos por 6 órbitas diferentes, nas quais se encontram 4 satélites em cada uma delas, compondo assim o sistema GPS. De realçar que para um posicionamento 2D (coordenadas de um local) são necessários no mínimo sinais de três satélites, sendo ainda necessário a adição de um quarto para um posicionamento 3D (Chapman, Thornes, & Bradley, 2002). Além das aplicações já mencionadas, este sistema pode também ser utilizado nas áreas da topografia, geodesia, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), cartografia digital entre outras. A esta tecnologia estão associadas vantagens como um alcance praticamente ilimitado a nível global, não é necessária a inter-visibilidade entre pontos, bom funcionamento sob quaisquer condições atmosféricas e qualquer hora do dia. Em contrapartida o sistema GPS é caracterizado por desvantagens como interferências com sinais eletromagnéticos, dificuldade de funcionamento em zonas extremamente arborizadas e necessidade de perfeita inter-visibilidade com os satélites acima do horizonte. Além das fragilidades mencionadas, a maior fonte de erro associada a esta tecnologia era a disponibilidade seletiva, uma degradação intencional do sinal GPS público implementado pelo governo por razões de segurança nacional. Em Maio de 2000, o governo cessou o uso desta opção (GPS.GOV, 2013).

Além das utilizações acima descritas, o estudo levado a cabo em Chapman et al., 2002 revela bons resultados obtidos nas estimativas do SVF via recetores GPS. O conceito baseia-se na restrição do número de satélites visíveis devido a obstruções, quer sejam elas edifícios, a própria topografia do local, ou qualquer outra obstrução. Assim, a não receção do sinal satélite é um bom auxiliar para uma estimativa do fator em questão. Na Figura 11 é demonstrado como é definido o número de satélites disponíveis (N) em determinado local, tendo sido para o efeito utilizada uma fotografia *fisheye*, Figura 11 a), que permite observar todo o hemisfério.

Ainda que em todo o hemisfério estivessem dispostos 9 satélites, apenas 4 (quadrados sombreados) estão visíveis a partir do local selecionado e disponíveis para triangulação, encontrando-se toda a área descoberta delimitada pela linha tracejada na Figura 11 b). Nos aparelhos GPS mais recentes, é possível determinar quantos satélites estão a ser contabilizados, além do valor de degradação de precisão (DOP- Dilution of Precision). Este índice é uma medida de precisão relativa à posição sugerida pelo satélite, em que os valores de DOP baixos correspondem a informação de alta qualidade, habitualmente conseguida pela proximidade de satélites. Outro índice relevante para as estimativas levadas a cabo é a intensidade do sinal, em inglês SSI (Satellite Status Index), de cada satélite disponível, com valores de 1 a 10 que reproduzem o rácio sinal/ruído. Esta grandeza é representada pelo somatório da força do sinal de cada um dos satélites visíveis. Na Figura 11 b) está apresentado o visor de um recetor GPS ilustrando como são dispostos os valores de DOP e SSI. Assim, o processo de estimativas do SVF descrito tem por base a utilização de múltiplas equações de

regressão, recorrendo às três grandezas referidas: número de satélites disponíveis, degradação de precisão e intensidade do sinal. Uma vez que o cálculo do SVF através de fotografias *fisheye* é considerado um dos métodos mais precisos atualmente elaborados, senão mesmo o mais preciso, é importante referir que foram também neste estudo calculados valores de SVF através de fotografias *fisheye*. O objetivo foi analisar a correlação entre os resultados dos dois métodos com o intuito de averiguar a precisão dos resultados utilizando a técnica via GPS.

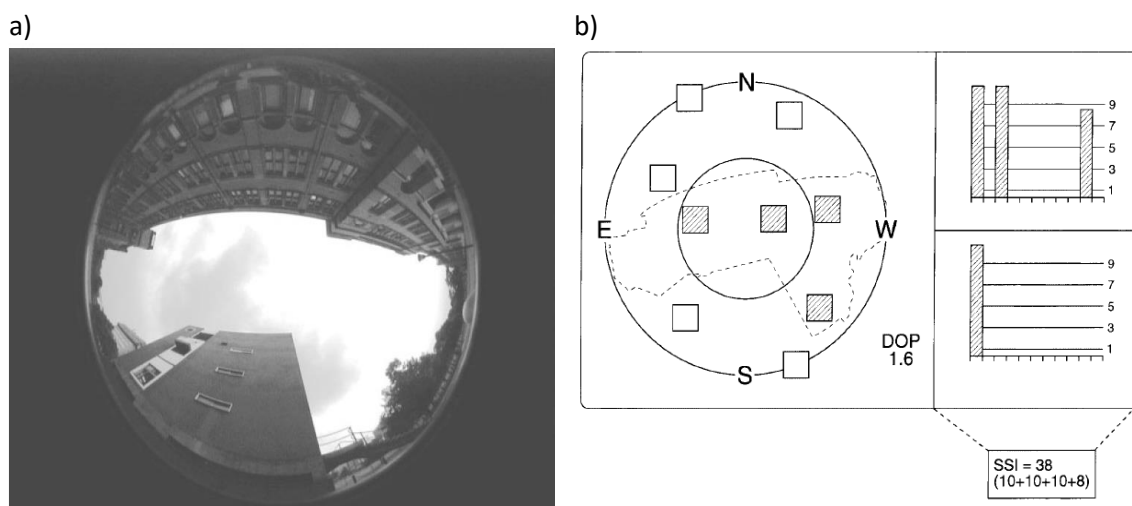


Figura 11 – a) Fotografia circular fisheye, b) display exemplificativo do ecrã GPS e de como é feita a definição dos satélites visíveis, e respetiva intensidade do sinal, no local da fotografia a) (Chapman, Thornes, & Bradley, 2002).

Os ensaios foram levados a cabo em 112 locais na cidade de Birmingham, Inglaterra, que se dividiam em quatro categorias: região urbana, suburbana, rural com árvores com folhas e rural sem folhas. Desta forma o grau de precisão dos resultados alcançados pôde ser diretamente relacionado com o tipo de região onde os mesmos foram obtidos. Dos três índices utilizados nas equações de regressão, o SSI foi o que apresentou constantemente as melhores indicações, independentemente da categoria da região. Em relação às diferenças registadas nos diferentes tipos de local onde os ensaios ocorreram, os resultados conseguidos em áreas urbanas foram os mais satisfatórios, enquanto em ambientes suburbanos os resultados foram os piores. A fraca prestação do método neste último cenário pode ser explicada pela conjugação de diferentes tipos de edifícios com elementos de vegetação mais abundantes que em áreas urbanas, representando desta forma um impacto no que à qualidade do sinal e número de satélites disponíveis diz respeito. Nos ambientes rurais os resultados foram mais favoráveis em zonas sem folhas nas árvores, como já seria de esperar, uma vez que as mesmas adicionam uma maior complexidade ao campo de visão, bem como promovem distorções na informação recebida nos recetores GPS devido às diferentes refletividades que espécies distintas apresentam. De qualquer forma, tanto as zonas com folhas como sem, apresentaram uma melhor relação que as áreas suburbanas.

Assim, a previsão do SVF via recetores GPS apresenta-se como um método rápido e pouco dispendioso que pode ser utilizado independentemente das condições atmosféricas que se façam sentir. Esta técnica abre também portas à possibilidade de aquisição de SVF bem localizados geograficamente em tempo real, através da ligação de um data-logger ao recetor GPS, permitindo assim um varrimento de áreas de maior extensão. Contudo, quando a precisão é um fator absolutamente fundamental, a obtenção de SVF a partir de fotografias *fisheye* continua a ser a melhor opção (Chapman, Thornes, & Bradley, 2002).



## 2.4 Modelos Digitais de Superfície (MDS)

Dado o avanço tecnológico no ramo da informática registado nas últimas duas décadas, hoje é possível lidar com grandes bases de dados e executar cálculos pesados recorrendo a métodos computacionais com alto grau de automatização. No que à estimativa do SVF diz respeito, apresentam-se de seguida exemplos de metodologias computacionais que recorrem a MDS.

### 2.4.1 Cálculo do SVF através de modelo digital de edifícios 3D

Uma das metodologias mais comuns baseia-se na informação contida em grandes bases de dados acerca da pegada dos edifícios (i.e. o seu *footprint*) e a respetiva altura. Desta forma é possível explorar as potencialidades dos SIG para lidar com este tipo de dados e criarem-se algoritmos para a estimativa do SVF em zonas pontuais desta enorme quantidade de informação, ou mesmo realizar essa estimativa para toda a área em causa. Uma abordagem deste tipo foi seguida em Unger (2009), onde se pretendeu relacionar o fenómeno de UHI (Urban Heat Island) com o SVF na localidade de Szeged, situada no Sul da Hungria.

A base de dados em questão foi conseguida recorrendo a plantas municipais disponíveis bem como a fotografias aéreas, tiradas em 1992 à zona de interesse, com o intuito de auferir a altura dos edifícios. Aquando da criação da base de dados, algumas das zonas fotografadas já tinham novas construções, o que implicou uma atualização para fotografias retiradas em 2003. Embora estivessem disponibilizadas as plantas detalhadas das áreas correspondentes às construções, as edificações com menos de 15 m<sup>2</sup> foram desprezadas do estudo uma vez que além de serem difíceis de identificar nas fotografias aéreas, também a sua contribuição ao nível da absorção/emissão de calor era negligenciável. Para se conhecer a elevação do terreno e dos possíveis pontos onde iriam ser avaliados os SVF, foi utilizado um modelo de elevação digital (MED), que na área em questão não apresentou grandes variações verticais (75.5 - 83 metros). Com o auxílio de *software* apropriado para trabalhar a informação compilada, nomeadamente o ERDAS IMAGINE e alguns dos seus módulos (OrthoBASE, Stereo Analyst e VirtualGIS), a criação de modelos relativos aos distritos em estudo era realizada, como se pode ver na Figura 12. A explicação mais detalhada da criação da base de dados pode ser encontrada em Unger (2009).



Figura 12 – MDS gerado pelo VirtualGIS (Unger, 2009).

Concluída a criação da base de dados 3D, os esforços foram então concentrados na criação do algoritmo. A base de dados representa uma versão simplificada da realidade, e por isso mesmo todos os edifícios foram representados com uma cobertura plana, permitindo assim assumir que todas as paredes da construção têm a mesma altura. A projeção dos edifícios no horizonte é tratada como a projeção das suas paredes vista de um determinado ponto de uma superfície, e um polígono é desenhado a partir das interseções entre a aresta das paredes com o horizonte. Desta forma é então delimitada a parte do céu visível da obstruída, que posteriormente é dividida em retângulos de igual largura através de um ângulo de rotação  $\alpha$ , cujas alturas são iguais à altura do ponto médio dos intervalos de rotação, como é demonstrado na Figura 13 a).

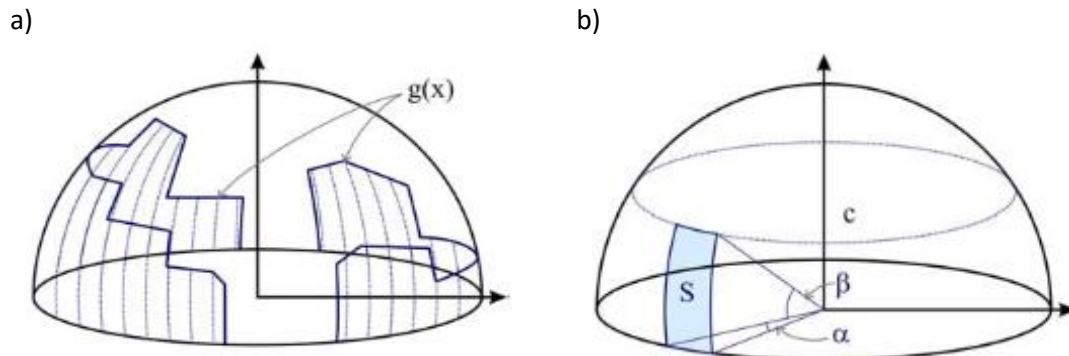


Figura 13 – a) Polígono  $g(x)$  a delinear a fronteira entre céu visível e obstruções, b) secção (S) de largura igual ao ângulo de rotação  $\alpha$  e altura  $\beta$  (Gal, Rzepa, Gromek, & Unger, 2007).

O cálculo do *View Factor* (VF) de uma superfície caracterizada por um ângulo de elevação  $\beta$  pode ser calculado pela equação ( 4 ).

$$VF = \sin^2 \beta \quad (4)$$

Assim, para uma secção (S) com largura de  $\alpha$ , Figura 13 b), o VF é dado pela equação ( 5 ).

$$VF_{secção} = \sin^2 \beta \cdot \left( \frac{\alpha}{360} \right) \quad (5)$$

O mecanismo utilizado pelo algoritmo passa por desenhar uma linha pelo ângulo de rotação a partir do ponto selecionado, e nessa mesma linha é encontrado o edifício que causa maior obstrução ao céu nessa direção. Identificado o edifício, a altura do mesmo é retirada da base de dados 3D para permitir o cálculo do VF correspondente à linha traçada para o ângulo de rotação  $\alpha$  definido. São calculados sucessivamente os VF para todas as linhas, e faz-se o somatório de todas as contribuições para finalmente se calcular o SVF através da equação ( 6 ).

$$SVF = 1 - \sum VF_{secção} \quad (6)$$

Para que o método descrito possa ser automatizado, a utilização do *software* ESRI ArcView 3.2 é conveniente. O algoritmo implementado no mesmo apenas necessita de dois *inputs*: o raio da circunferência dentro da qual se vão efetuar as medições das alturas e posicionamento dos edifícios, e a amplitude dos intervalos do ângulo de rotação (Unger, 2009).

Relativamente à precisão do método, pode-se afirmar que é um modelo muito versátil, capaz de ser adaptar a áreas de estudo consideravelmente extensas, e facilmente ajustável ao nível de complexidade das envolventes a estudar. Para uma análise mais detalhada, preferencialmente para zonas com mais obstruções, basta diminuir a magnitude do ângulo de rotação escolhido, para que o algoritmo seja mais preciso na procura de obstruções e forneça

estimativas de SVF mais rigorosas, o que significa naturalmente um maior tempo de processamento. Uma falha atribuída a esta técnica, que utiliza exclusivamente bases de dados referentes a edifícios, prende-se com a falta de informação dos locais onde a vegetação urbana é mais expressiva. Também a falta de sinais de trânsito nestas mesmas bases de dados podem ser problemáticos, podendo por vezes representar obstruções consideráveis que influenciam o SVF. Uma adição de informação acerca destas lacunas nas bases de dados utilizadas por ser a solução para tornar esta abordagem mais completa (Gal, Rzepa, Gromek, & Unger, 2007).

### **2.4.2 Raytracing com MDS**

O cálculo do SVF recorrendo ao método de *raytracing* tem por base um MDS, que habitualmente é criado através de levantamentos LiDAR. Os levantamentos LIDAR, via meio aéreo, consistem em feixes laser infravermelhos emitidos em direção ao solo que são posteriormente recebidos, devido à sua reflexão, em bandas paralelas ao longo da trajetória da plataforma aérea. O tempo de voo de cada feixe permite conhecer a distância entre a superfície emissora e a recetora, quer tenha o feixe sofrido a reflexão no solo ou noutra qualquer obstrução. Agregando ainda informação de um instrumento de localização GPS instalado na própria plataforma, bem como os ângulos de emissão dos feixes, são obtidas as coordenadas 3D de cada ponto onde se deu a reflexão do sinal, elaborando por fim um mapeamento georreferenciado das cotas da superfície rastreada, como que vistas de cima. O processo de *raytracing* consiste então no número de fontes de luz, distribuídas ao longo da cúpula hemisférica, que são visíveis a partir do ponto no MDS em análise. O SVF é alcançado pelo quociente entre o número dos pontos visíveis face a todos os espalhados no hemisfério.

Um exemplo desta metodologia é o algoritmo denominado SOL, desenvolvido na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, que consiste numa ferramenta que permite o cálculo da radiação solar em telhados, fachadas e no solo, para estimar o potencial fotovoltaico direcionado para contextos urbanos. Escrito na sua totalidade em linguagem MATLAB, tem como *inputs* necessários um mapa georreferenciado do relevo local, um MDS que caracterize as formas e alturas dos elementos presentes, e por fim a informação respeitante à radiação solar da área em estudo. A nível de *output* o SOL fornece o mapa de sombras, de SVF e de radiação, direta e difusa, incidente em qualquer ponto da área urbana selecionada, para um intervalo temporal que pode ir de 1h a 1 ano (Redweik, et al., 2015).

Com o objetivo de analisar o potencial fotovoltaico de uma dada área, três tipos de elementos são habitualmente distinguidos no MDS: o solo, a vegetação e os edifícios. Todos estes elementos são relevantes para este tipo de estudos uma vez que são responsáveis tanto pela captação como pela obstrução de radiação solar, face aos elementos que os rodeiam. Para isso, o MDS que sustenta o algoritmo foi elaborado através da aquisição de dados LIDAR. A área relativa à informação LIDAR utilizada no algoritmo SOL, que entre outras, contemplou a análise do próprio campus da Faculdade de Ciências, sensivelmente 400 x 400 m<sup>2</sup>, continha uma densidade média de medições de 20 pontos por m<sup>2</sup>, que foram posteriormente reajustados para uma amostra de 1 ponto por m<sup>2</sup>, criando uma malha na qual cada m<sup>2</sup> contem apenas um valor de cota. Através da inclinação e orientação de terreno representada no MDS, todas as células com inclinação superior a 72° foram consideradas como fachadas, sendo desta forma construído um mapa binário, valor 1 para células correspondentes a fachadas e 0 para o resto, onde apenas constavam os elementos correspondentes a fachadas. Apesar de identificadas as células que representam fachadas, as mesmas não eram produzidas

diretamente pelo varrimento LIDAR, por isso o conceito de hiperponto cumpriu esse mesmo objetivo. Um hiperponto consiste numa agregação de vários pontos com as mesmas coordenadas XY, onde apenas a coordenada Z é diferente para cada um, permitindo assim a representação de todos esses pontos ao longo de uma coluna vertical. No caso de estudo, os pontos eram gerados de 1 em 1 metro até que fosse alcançado o plano horizontal mais próximo, gerando assim as fachadas existentes na área de estudo.

O modelo de radiação solar utilizado neste estudo recorre à série de referência para Lisboa, que compila valores de irradiação horizontal média, direta e difusa, medidos hora a hora ao longo de mais de 30 anos. Esses valores são posteriormente tratados de forma a transformá-los em irradiação local, ponderando fatores como a inclinação, orientação, sombra e SVF. Para a criação do mapa respeitante à componente direta da radiação, incidente tanto no solo e telhados como nas fachadas, um algoritmo específico para gerar um mapa de sombras foi elaborado previamente, utilizando com *inputs* o MDS, o mapa de fachadas binário e o azimute e altitude do sol de cada hora do ano. Todo o procedimento efetuado encontra-se detalhadamente descrito em Redweik et al. (2013). Relativamente à radiação difusa, neste estudo não foi ponderada a fração com origem em reflexões no meio urbano, sendo apenas considerada a proveniente da própria atmosfera e nuvens. Assim, é assumido que até zonas sombreadas podem estar expostas a radiação difusa, sendo apenas necessário que alguma porção do céu seja visível do local em questão. Para realizar essa estimativa foi então calculado o SVF de cada  $m^2$  da área analisada, tanto para os pixéis referentes ao solo e telhados como também para as fachadas. Na Figura 14 está representado o mapa de SVF para o solo e telhados do campus.

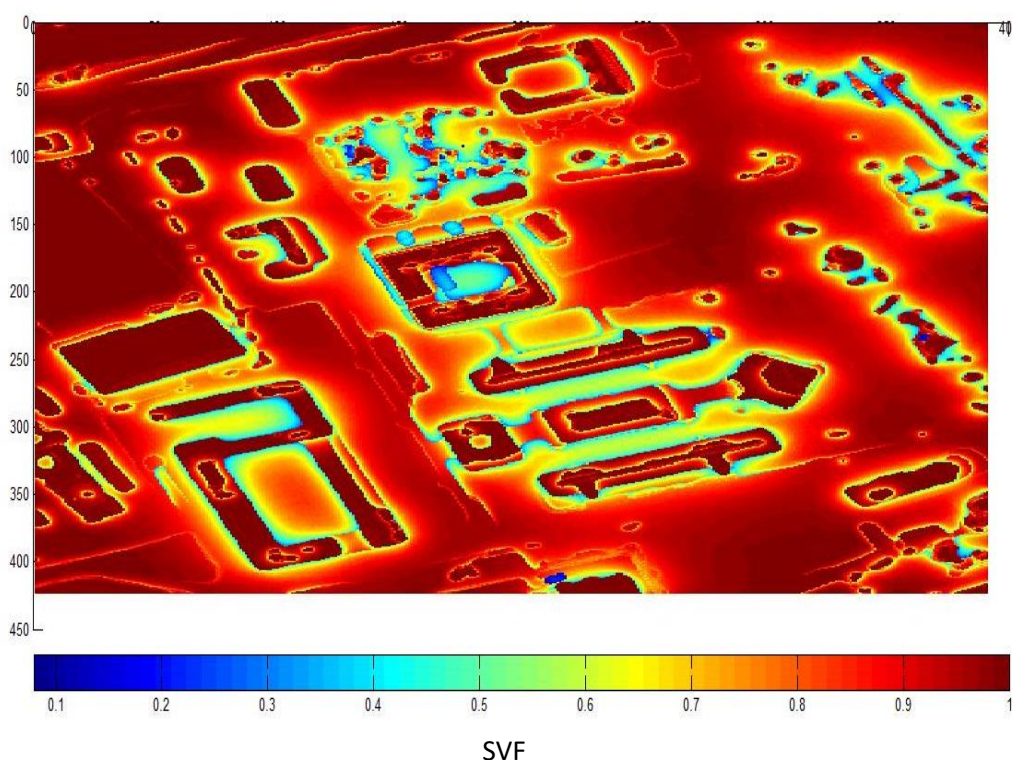


Figura 14 – Mapeamento do SVF no solo e telhados do campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, através do algoritmo SOL.

Para o cálculo dos SVF desejados, foram consideradas 1081 fontes de luz que preenchem todo o hemisfério. O posicionamento dessas fontes era espaçado de  $5^\circ$ , a partir dos  $15^\circ$  de altitude, até ao zénite, e também uma separação de  $5^\circ$  entre azimutes até preencher todo o horizonte.

Através do MDS e do algoritmo que gera os mapas de sombras, cada célula da área alvo era ou não atingida por uma das fontes luminosas, sendo o processo repetido até que todas as fontes fossem testadas. Por fim, o SVF da célula em causa seria o quociente entre o número de vezes que a mesma foi atingida pelas fontes luminosas e as 1081 vezes possíveis. Na Figura 15 é apresentado um exemplo de como o processo descrito é executado, onde apenas está representada a área hemisférica descoberta a partir do ponto central do MDS reproduzido.

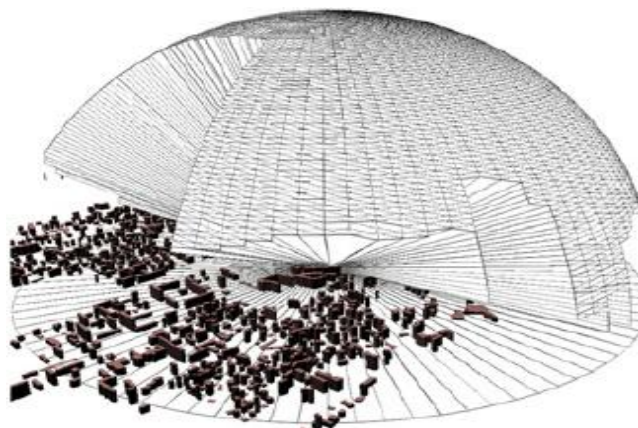


Figura 15 – SVF é o rácio entre a área de céu aberto e a área total hemisférica (Brasebin, Perret, Mustière, & Weber, 2012).

A abordagem para o cálculo do SVF nas fachadas é executada de outra forma, tendo por base os hiperpontos que caracterizam o mapa de fachadas. Todos os elementos de cada hiperponto iniciam o processo contabilizando as 1081 fontes de luz, como se fossem atingidos por todas elas. Depois, o algoritmo de sombra é aplicado a cada fonte luminosa, sendo posteriormente comparadas as alturas entre a célula no mapa de sombra das fachadas com o seu respetivo elemento do hiperponto. Caso o elemento do hiperponto tenha uma altura inferior à altura da sombra nesse mesmo par de coordenadas XY, significa que essa mesma célula da fachada não será atingida pela fonte de luz que está em análise, e assim é retirado um ponto aos 1081 totais. Este ciclo é efetuado para todos os elementos de cada hiperponto, 1081 vezes, dando a conhecer quantas fontes de luz cada  $m^2$  de fachada intercetou. Finalmente, o SVF é calculado através do quociente anteriormente descrito, permitindo assim a construção de um mapa de SVF referente exclusivamente às fachadas, como demonstra a Figura 16.

Multiplicando o valor de SVF de um local pela irradiação difusa em todo o hemisfério, incidente num plano horizontal, é por fim obtido o valor da parcela da radiação difusa.

O SOL caracteriza-se então como um modelo muito útil no que à avaliação de potencial fotovoltaico urbano diz respeito, complementando os resultados obtidos para o solo e telhados, habitualmente conseguidos com outros modelos, com os relativos a fachadas (Redweik, Catita, & Brito, 2013). É um modelo que se encontra em constante melhoramento, tanto no que respeita a redução do tempo dos seus processos computacionais, como também na tentativa de ultrapassar as limitações adjacentes ao formato *raster* dos *inputs* (Redweik, et al., 2015). O MDS no qual se baseia o modelo foi obtido a partir de um levantamento LiDAR de 2006, o que pode indicar uma representação pouco atual dos edifícios e, acima de tudo, sem o devido detalhe que a vegetação merece, como é referido no subtópico seguinte. Neste estudo, apenas o cálculo de SVF presente neste modelo será alvo de validação por comparação com método fotográfico *fisheye*.



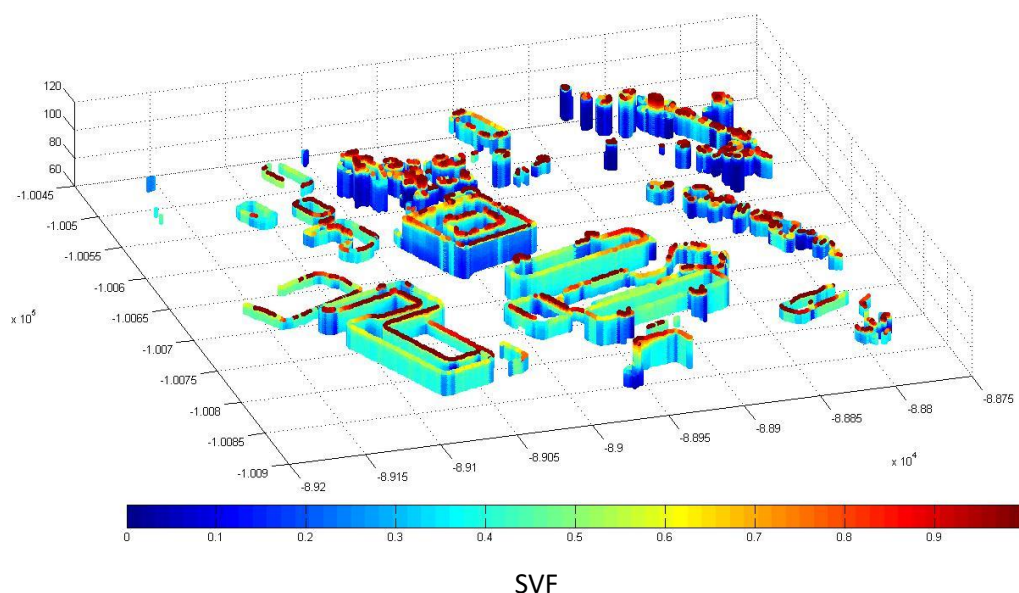


Figura 16 – Mapeamento do SVF nas fachadas do campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, através do algoritmo SOL.

### 2.4.3 SVF através de modelo digital de edifícios e vegetação

Uma crítica apontada regularmente à utilização de bases de dados urbanas para o estudo do SVF, é a falta de rigor proveniente da ausência de caracterização da vegetação urbana. Recentemente foram desenvolvidas duas opções que permitem avaliar a vegetação para este objetivo: o método de SOLWEIG (Lindberg, & Grimmond, 2010) que aplica modelos digitais *raster* para representar tanto edifícios como zonas com vegetação, e o SkyHelios *software* (Matzarakis & Matuschek, 2010; Hammerle, Gál, Unger, & Matzarakis, 2011). O primeiro método tem a desvantagem associada ao formato *raster*, no qual a precisão dos resultados pode ser afetada de acordo com a escolha de resolução da informação que vai servir de *input* (Lindberg, 2007). A explicação reside no facto da maioria dos modelos recorrerem a MDS em formato *raster*, e uma vez que as bases de dados de edifícios estão habitualmente no formato vetorial, é necessária uma conversão vetor-*raster* que suscita possíveis perdas de informação e, consequentemente, alteração de resultados inerentes ao cálculo do SVF. Contudo, os valores de SVF obtidos tanto com modelos *raster* como vetoriais são muito semelhantes (Gál, Lindberg, & Unger, 2009). Já o segundo método exige uma base de dados pormenorizada da vegetação que pode ser alcançada com medições *in situ*, tornando-se um processo mais demorado. Assim, em 2014 foi publicado um estudo que tinha como objetivo a criação de um método que avaliasse automaticamente tanto a localização da vegetação como dos edifícios, com o intuito de se proceder ao estudo do SVF com maior precisão. O estudo foi levado a cabo na mesma cidade do estudo descrito anteriormente, na cidade de Szeged, Hungria.

Para a elaboração deste novo método, no qual iriam constar tanto edifícios como vegetação urbana, foram utilizados como suporte métodos fotogramétricos e informação espectral retirada de fotografias aéreas. Bases de dados de edifícios e vegetação foram necessárias para o cálculo do SVF. Para uma avaliação automática das copas das árvores, realizada pelo *software* Tree-crown mapping tool (TCM), dois *inputs* eram necessários: a elevação e o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), i.e. índice de vegetação por diferença normalizada. Relativamente à elevação, a informação da nuvem de pontos 3D foi conseguida através do método fotogramétrico, que permite efetuar medições rigorosas de objetos

contidos na fotografia em si. A avaliação da informação da nuvem de pontos 3D e o próprio cálculo do NDVI foram feitos a partir de fotografias aéreas digitais de quatro bandas espectrais, fornecidas pelo Instituto Húngaro de Geodesia, Cartografia e Detecção Remota. Estas quatro bandas espectrais são compostas por três na região do visível e uma no infravermelho. Devido à sua resolução espectral e espacial, são indicadas para calcular índices de resolução espectral, como é o caso do NDVI, assim como para efetuar levantamentos de elevação utilizando métodos fotogramétricos (Gál & Unger, 2012). As fotografias aéreas foram avaliadas pelo *software* Leica Photogrammetric Suit (LPS), que, recorrendo a uma ferramenta incorporada no próprio, *enhanced Automatic Terrain Extraction* (eATE), permitiu retirar a elevação dos pontos representados nas fotografias (Gál & Unger, 2014). Por outro lado, o NDVI, que consiste numa escala com valores entre -1 e 1, distingue os diversos tons de verde em função dos diferentes comprimentos de onda que cada planta reflete (Weier & Herring, 2000), permitindo assim identificar as copas das árvores de entre todos os outros pontos. Depois de identificadas e medidas as elevações associadas às copas das árvores, o seu mapeamento foi levado a cabo pelo *software* TCM. Esta ferramenta pode também, caso lhe seja solicitado, realizar as medições de uma base de dados relativa a plantas de edifícios, se a mesma for disponibilizada. A partir do valor NDVI, são desenhados polígonos de Thiessen em torno dos pontos identificados na nuvem de pontos como sendo copas de árvores. O resultado final é um documento que contém a localização das árvores com os respetivos valores de elevação descritos na tabela de atributos. Opcionalmente o *output* pode ser o mesmo para os edifícios. Na Figura 17 está representado o produto gerado pelo TCM, uma base de dados contendo edifícios e árvores coloridos consoante a sua elevação.



Figura 17 – Base de dados de edifícios e vegetação colorida consoante elevação de cada elemento (Gál & Unger, 2014).

Finalizada a base de dados, o algoritmo para o cálculo do SVF baseou-se na equação ( 6 ) descrita anteriormente, onde os VF apenas contemplavam os edifícios. Adicionada a informação relativa à vegetação, a equação original foi alterada de forma a ponderar novas obstruções. A equação passou a considerar: edifício (B) com o maior ângulo de elevação ( $\beta$ ) numa dada direção, a árvore ( $T_1$ ) com maior ângulo de elevação ( $\beta+\gamma$ ) na mesma direção e a árvore ( $T_2$ ) com o maior ângulo zenital ( $\delta$ ) de todas as visualizadas, nessa mesma direção, Figura 18 a).

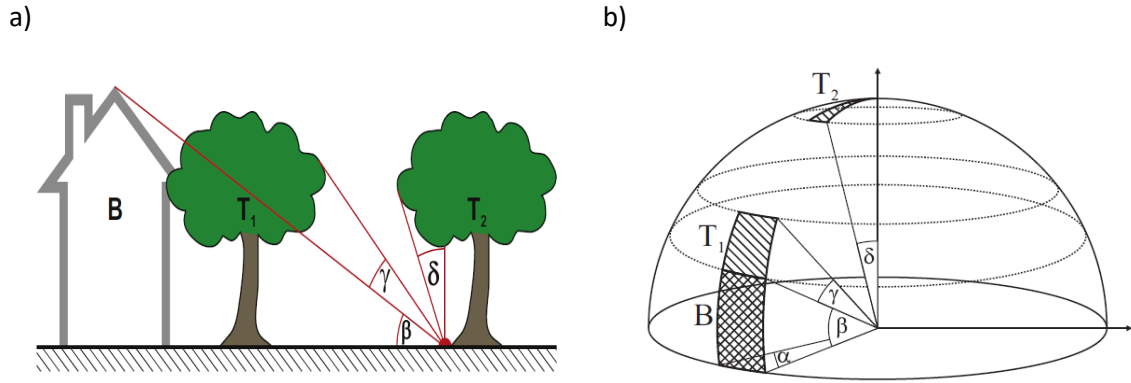


Figura 18 – a) ângulos de elevação de diferentes elementos em determinada direção, b) polígonos marcados no hemisférios correspondentes a um edifício (B) e dois tipos de árvores ( $T_1$  e  $T_2$ ) (Gál & Unger, 2014).

Uma vez que as árvores são caracterizadas por determinada transparência ( $\tau$ ), a equação ( 5 ) reescreve-se da seguinte forma, considerando todas as direções ( $\omega$ ):

$$SVF = 1 - \left( \int_0^{2\pi} \sin^2 \beta d\omega + \int_0^{2\pi} \tau \cdot (\sin^2 (\beta + \gamma) - \sin^2 \beta) d\omega + \int_0^{2\pi} \tau \cdot (1 - \sin^2 (90^\circ - \delta)) d\omega \right) \quad (7)$$

Ao valor de transparência utilizado nesta equação é atribuído o valor médio da mesma de acordo com todas as espécies existentes no local em estudo. Na equação ( 7 ) tem-se no primeiro integral a ponderação relativa ao edifício (B) que maior obstrução provoca, sendo o segundo referente à árvore  $T_1$ , enquanto o terceiro integral se remete à árvore  $T_2$ . Seguindo o mesmo conceito do algoritmo apresentado anteriormente, um ângulo de rotação  $\alpha$  é escolhido por forma a analisar toda a envolvente, secção a secção, Figura 18 b). Novamente, quanto menor for esse ângulo mais minuciosa vai ser a análise. A equação ( 7 ) toma então a forma:

$$SVF = 1 - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{2\pi} \sin^2 \beta_i + \sum_{i=1}^n \tau \frac{\alpha}{2\pi} (\sin^2 (\beta_i + \gamma_i) - \sin^2 \beta_i) + \sum_{i=1}^n \tau \frac{\alpha}{2\pi} (1 - \sin^2 (90^\circ - \delta_i)) \right) \quad (8)$$

em que  $n$  representa o número de divisões do círculo hemisférico ( $n = 360^\circ/\alpha$ ). Mais uma vez o comportamento da ferramenta em si é muito parecido com o referido no tópico anterior, em que a primeira linha desenhada é na direção Norte sendo o resto do processo continuado no sentido horário. É necessário mais uma vez fornecer a distância à volta do ponto onde se vão realizar as medições bem como a amplitude do ângulo de rotação  $\alpha$ .

Os resultados conseguidos com o método aplicado foram muito satisfatórios na medida em que é significativamente notada a presença da vegetação no cálculo do SVF. Na Figura 19 foi elaborada uma demonstração da influência que o contributo das copas das árvores têm no cálculo do SVF, sendo a Figura 19 a) o histograma relativo ao SVF sem ponderação da vegetação urbana, enquanto a Figura 19 b) contabiliza a mesma.



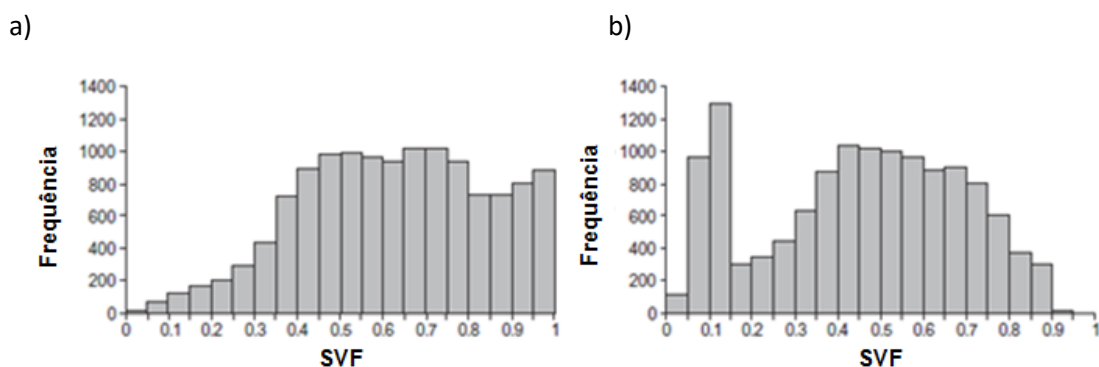


Figura 19 – Histograma de SVF calculados a) sem copas das árvores, b) com copas das árvores (Gál & Unger, 2014).

Através dos resultados é fácil constatar que o número consideravelmente maior de SVF altos sem a presença de vegetação, Figura 19 a), é contrariado pela redução do mesmo quando a vegetação já faz parte da base de dados. O tempo de cálculo deste processo é rápido e é considerado tão rigoroso como qualquer método vetorial (Gál & Unger, 2014).

Ao longo do capítulo registaram-se diferentes metodologias que de certa forma se complementam, destacando as suas vantagens onde outros métodos possivelmente revelam fraquezas. A título exemplificativo, o método fotográfico destaca-se de todos os outros devido à sua capacidade de detalhe, definindo com melhor precisão envoltórios complexos e irregulares que qualquer método que recorra a MDS, perfilando-se como a escolha indicada para estudos pontuais, como é o caso de uma instalação fotovoltaica residencial, onde um levantamento LiDAR não faria sentido para uma área tão pouco extensa. No entanto, se o propósito passar pela completa modelação de uma área urbana, onde se pretenda adquirir uma distribuição de SVF contínua ao longo de ruas, fachadas e coberturas, os métodos que utilizam MDS posicionam-se como os mais interessantes e com melhor desempenho quando de grande escala se trata, uma vez que os levantamentos LiDAR requerem uma área mínima de cobertura na ordem dos 50 hectares. Por outro lado, o método GPS apesar de não se destacar pela exatidão em nenhuma situação em concreto, apresenta um potencial interessante para cobrir várias aplicações, aliando a sua portabilidade e capacidade de aquisição de grandes quantidades de informação quando ligado a um *data logger*. Assim, torna-se importante ressaltar que cada método de cálculo de SVF tem as suas valências e fraquezas, sendo importante avaliar qual a melhor opção consoante a finalidade pretendida.



### 3. Metodologia

Com base na revisão de metodologias existentes para determinação do SVF, foram selecionados os métodos a analisar com mais detalhe no presente estudo. As opções escolhidas tinham de ser caracterizadas pela simplicidade de aquisição e tratamento de dados, precisão de resultados, mas ao mesmo tempo representarem uma forte coesão no binómio custo/eficiência.

Assim, respeitando os critérios que se tinham tomado como imprescindíveis, foram selecionadas duas metodologias com o intuito de as comparar posteriormente com o método fotográfico *fisheye*: a aproximação de SVF via recetores GPS e o método de *raytracing* com MDS. A metodologia GPS, apesar de não se afirmar como um método extremamente preciso, é uma abordagem relativamente recente que se revela bastante aliciante devido à sua portabilidade e facilidade de aquisição de grandes quantidades de informação. É também uma opção consideravelmente mais barata face aos equipamentos e licenças de *software* necessários para os outros métodos revistos. Em relação ao método de *raytracing* que recorre a um MDS para efetuar as suas estimativas de SVF, tem como mais valia a facilidade de lidar com grandes bases de dados e possibilidade de automatização de cálculos exigentes a nível computacional.

#### 3.1 Local de estudo

A escolha dos locais nos quais iam ser aplicadas as metodologias selecionadas baseou-se nos MDS disponíveis de locais próximos: o campus da Faculdade de Ciências (FCUL), uma área do bairro de Alvalade e outra localizada no Campo Pequeno.

Selecionou-se o campus da FCUL como a primeira área a explorar, tendo sido primeiro elaborada uma seleção de locais de interesse para aplicar os métodos sugeridos. O MDS em causa representa uma grande variedade de elementos, desde os próprios edifícios da faculdade, edifícios adjacentes, áreas de vegetação de grande porte e densidade, áreas com uma envolvente aparentemente simples e desobstruída ou pátios com um grau de obstrução considerável. Toda esta diversidade de elementos serviu como forma de testar os métodos sob influência de diferentes obstruções, sendo até alguns dos locais escolhidos precisamente com o intuito de ir ao encontro das fragilidades identificadas nos métodos em foco, aquando da revisão literária. Representados na Figura 20 estão os 13 locais no campus da faculdade nos quais foram levadas a cabo as medições necessárias para cada uma das metodologias propostas.

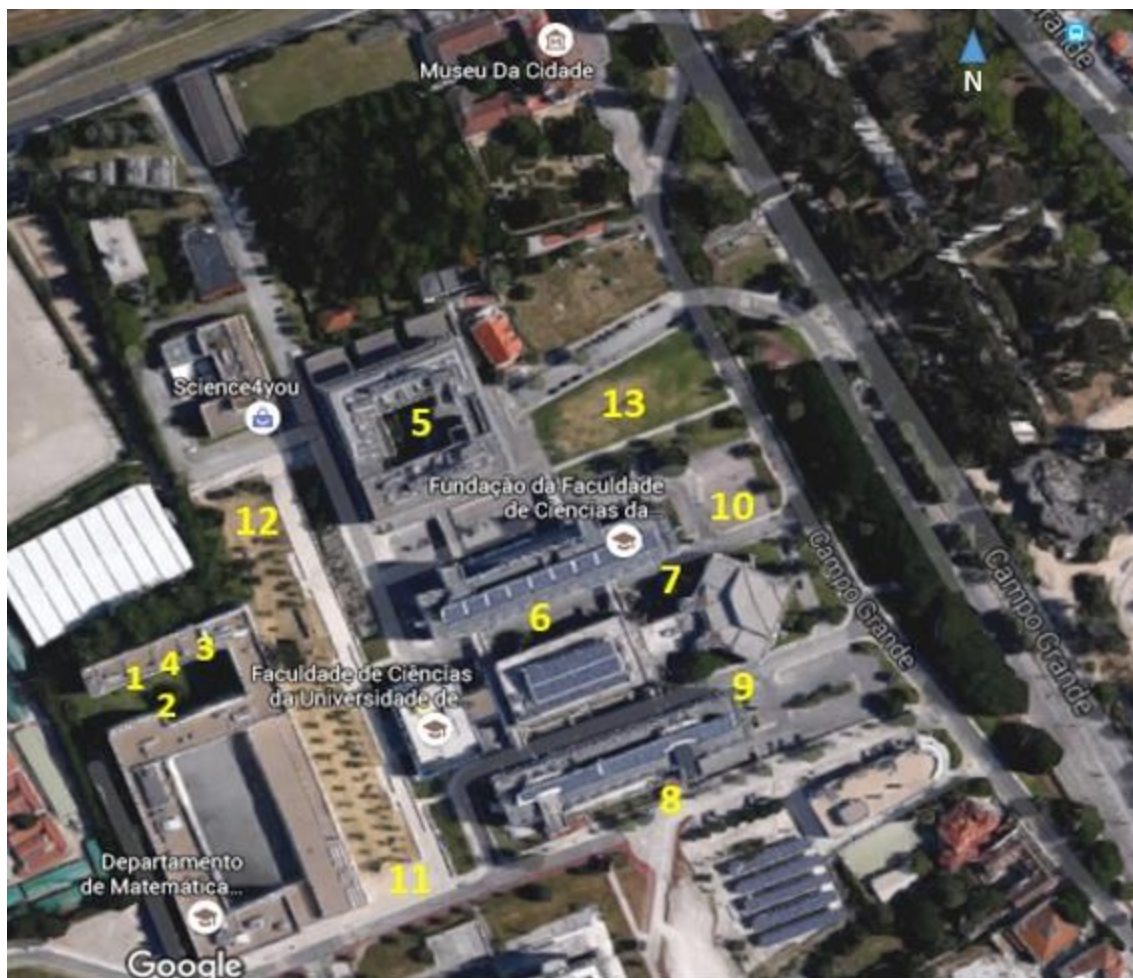


Figura 20 – Locais selecionados para a implementação das metodologias em foco, no campus da FCUL. Locais 1, 3 e 4 representantes de fachadas.

Tal como referido, e como se pode constatar, existiu uma preocupação em serem escolhidos pontos distintos entre si ao longo da área em estudo, usufruindo das diferentes vertentes representadas no MDS, como se segue na Figura 21.

Locais	Elementos presentes
2 e 5	pátio
10, 11, 12 e 13	baixo grau de obstrução aparente
10 e 12	vegetação fortemente representada
1, 3 e 4	fachadas de edifícios
6, 7, 8 e 9	proximidade a edifícios altos

Figura 21 – Diversidade de elementos presentes ao longo dos 13 locais analisados.

Apesar de terem sido efetuados levantamentos em mais locais do que os representados (ao todo 86 no método fotográfico) por impossibilidade de automatização do processo de tratamento tanto das fotografias como dos dados GPS recolhidos, foram apenas estes os 13 locais onde as diferentes metodologias foram integralmente executadas.

## 3.2 Fotografia *fisheye*

### 3.2.1 Equipamento

Para a aplicação do método fotográfico *fisheye*, o equipamento escolhido teria de respeitar as condições pré-estabelecidas no início do presente capítulo. Foi elaborada uma pesquisa com vista a seleccionar um conjunto de lentes *fisheye* que conseguissem o objetivo proposto. Atualmente existe uma vasta gama de lentes criadas para este conceito, desde as de pequena dimensão destinadas ao acoplamento em *smartphones*, que apresentam preços acessíveis mas uma qualidade não muito elevada, até às mais evoluídas que apresentam um corpo mais pesado e robusto, mas que obviamente se encontram numa gama de preços mais dispendiosa (colorfoto, 2016), derivado da elevada qualidade das imagens por si conseguidas. Após uma pesquisa mais abrangente, a escolha baseou-se na qualidade reconhecida à lente em questão, bem como o facto de ser uma opção economicamente viável. Assim, o equipamento utilizado foi uma Olympus SP-350 de 8 megapíxeis, com uma lente conversora *fisheye* Nikon FC-E8, à qual foi acoplado um anel adaptador para que a compatibilidade com o corpo da máquina fosse conseguido, como surge na Figura 22 a).

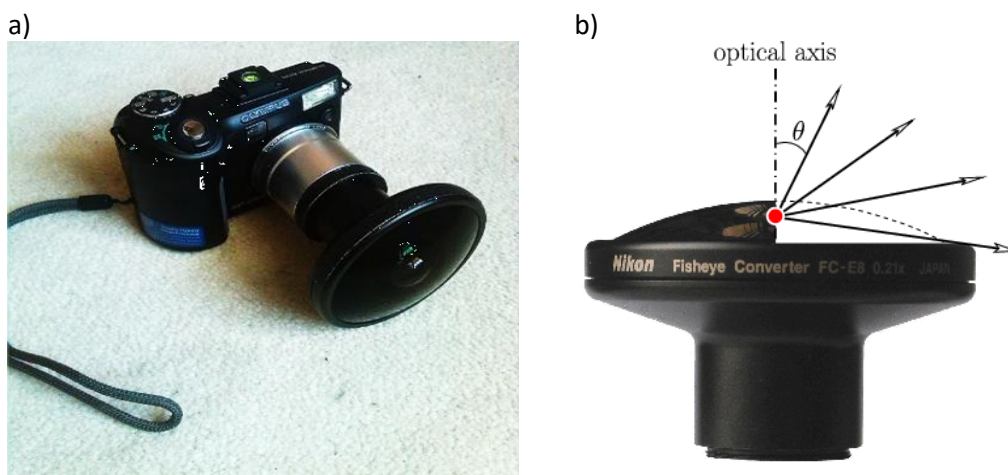


Figura 22 – a) Câmara digital Olympus SP-350 com anel adaptador e conversor fisheye, b) conversor fisheye Nikon FC-E8 e indicação do campo de visão proporcionado.

O conversor é um equipamento reconhecidamente capaz de garantir a qualidade de deteção de obstruções, já tendo sido utilizado, entre outros, em Grimmond et al (2001), Janus Unger (2009), que proporciona um campo de visão superior a 180°, Figura 22 b), permitindo então uma perspetiva hemisférica ideal que pode ser utilizada na vertente de estudos de previsão meteorológica e astronomia. Quanto às imagens resultantes da utilização deste conversor, em Frazer et al. (2001) a projeção desta lente é dada como equiangular (habitualmente também designada de equidistante), após uma calibração radial levada a cabo para diferentes tipos de lente *fisheye*. O *output* obtido são imagens circulares caracterizadas por uma projeção equidistante, e uma vez que o produto final são, como referido, imagens circulares, faz sentido falar em projeção azimutal equidistante. Esta, habitualmente vista em mapas, é caracterizada pela manutenção da distância correta dos pontos em relação ao ponto central, bem como o azimute correto de qualquer ponto representado face ao centro da imagem. Por outras palavras, as formas dos conteúdos das imagens não são mantidas mas as distâncias face ao centro da imagem sim, conseguindo desta forma uma proporcionalidade entre os ângulos com que os objetos são detetados pela lente (ângulo zenital) e a distância a que os mesmos serão representados face ao ponto central da imagem (Nikon Corporation , 2014; MedLibrary.org,

2014). Na Figura 23 é apresentado um exemplo da projeção indicada, onde se observa que a distância radial é representada em função de um fator linear do ângulo de altitude a que o objeto é identificado, mantendo assim constantes os incrementos radiais tanto perto do horizonte como do zénite (wiki.naturalfrequency, 1994).

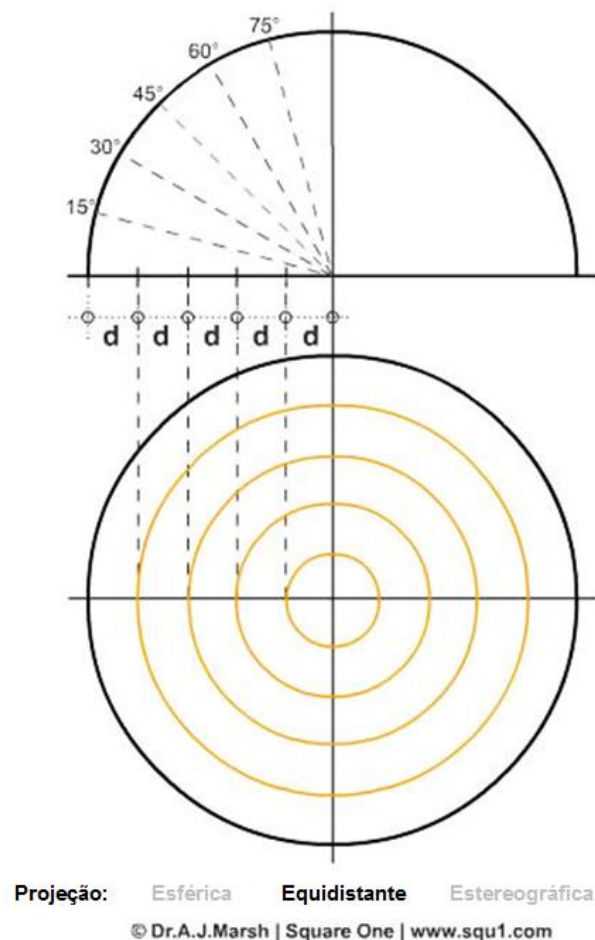


Figura 23 – Representação de uma projeção polar equidistante (wiki.naturalfrequency, 1994).

### 3.2.2 Aquisição e tratamento de dados

Os ensaios levados a cabo com esta metodologia necessitavam de, preferencialmente, ser executados em condições meteorológicas específicas, onde o céu se apresentasse nublado e o mais homogêneo possível, em virtude das limitações referidas na parte final do subtópico 2.1. A não utilização de um filtro fotográfico que lidasse com os problemas de sobre-exposição fez com que, antes de serem tiradas as fotografias, fosse reforçada a necessidade de serem consideradas as condições meteorológicas do dia, uma vez que uma eventual sobre-exposição poderia promover demasiado brilho em certas zonas da fotografia e prejudicar o posterior tratamento da mesma, aquando da obtenção dos valores de SVF. Além do equipamento mencionado na secção anterior, recorreu-se a um tripé que tinha incorporada uma bússola de nível, para que fosse garantida uma adequada nivelção do equipamento e para conferir fixação e estabilidade nos ensaios realizados.



Os levantamentos fotográficos foram então realizados nos locais previamente escolhidos, sendo que todos eles, com exceção dos locais relativos a fachadas, foram executados a uma altura de 1.2 metros. No que aos ensaios das fachadas diz respeito, as fotografias foram conseguidas através da abertura possível por parte das janelas, onde a câmara foi colocada no exterior o mais alinhada possível com o plano vertical da própria fachada. Após terem sido efetuados os levantamentos fotográficos relativos aos 13 locais alvo, iniciou-se o processamento das imagens com vista à aquisição do respetivo parâmetro SVF. Nesta etapa recorreu-se ao *software SkyViewFactorCalculator* (Lindberg & Holmer, 2010). Esta ferramenta foi escolhida com base na facilidade e rapidez com que permite tratar imagens *fisheye* circulares e determinar o respetivo SVF, além de ser *freeware*. Os valores de SVF gerados por este *software* são obtidos recorrendo a dois métodos de cálculo distintos: o método de pixéis (Holmer, Postgard, & Eriksson, 2001), e o dos anéis concêntricos (Johnson & Watson, 1984). Na Figura 24 é apresentado o diagrama que evidencia as etapas inerentes ao cálculo do SVF segundo o método de pixéis.

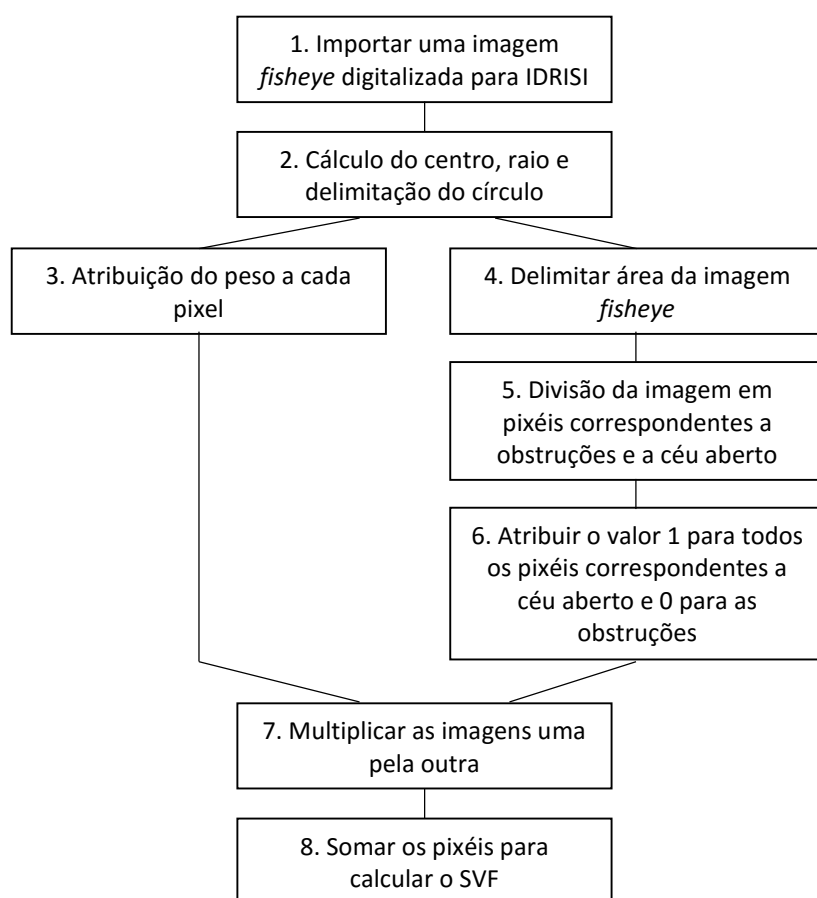


Figura 24 – Etapas de cálculo do SVF através do IDRISI (Holmer, Postgard, & Eriksson, 2001).

A primeira etapa passa naturalmente pela importação da imagem *fisheye* para o IDRISI, *software* que trabalha com informação *raster* e por isso as coordenadas de cada pixel na imagem são calculados em função de colunas e linhas. No segundo passo é calculado o centro, o raio e a delimitação do círculo que contem a imagem *fisheye*, através das equações de círculos determinadas com a seleção de três pontos na circunferência que delimita a fotografia.

O terceiro passo consiste na criação de uma imagem onde os diferentes pesos de cada pixel são atribuídos, em função do diâmetro da circunferência. A importância deste detalhe

relaciona-se com a necessidade de contabilizar as dimensões reais dos elementos detetados no céu em função da sua projeção numa superfície plana, segundo a sua distância angular face ao zénite. Para isso, o peso atribuído a cada pixel é avaliado através de anéis concêntricos, tal como no outro método proporcionado pela ferramenta, embora no IDRISI sejam utilizadas tantas bandas quantos os pixéis presentes no raio da circunferência. Este passo sofre influência direta do valor dado como campo de visão da lente, anteriormente referido no subtópico 2.1. No passo 4, toda a zona além da circunferência definida no passo 2 será coberta. O passo 5 é o responsável pela divisão da imagem em pixéis correspondentes a obstruções e a céu aberto. Este processo, além de ter em conta a frequência da distribuição do valor digital dos pixéis, consegue a referida distinção obstrução/céu aberto ao analisar o valor de pixel a pixel ora no lado da obstrução, ora no lado da não obstrução. Com isto, atuando de forma a convergir no mesmo pixel vindo de lados opostos, é encontrada a limitação obstrução/não obstrução quando se verificar a alteração mais drástica de valor de pixéis adjacentes. Após a limitação se dar como concluída, é elaborada uma reclassificação dos valores de pixéis da imagem para o valor 1 nos correspondentes a céu e 0 para os relativos a obstrução (passo 6). O passo 7 é onde se dá o produto da imagem que contem a reclassificação binária com a imagem dos pesos dos pixéis.

Por fim, para concluir o cálculo do SVF, é concretizado o somatório dos valores dos pixéis da imagem obtida no passo 7 (Holmer, Postgard, & Eriksson, 2001). Os passos aqui descritos vão de encontro aos documentados em 2.1, na medida em que expõem os processos que sustentam o funcionamento dos botões do *software*. Tal como referido anteriormente, a ferramenta utilizada é totalmente escrita em ambiente MATLAB, embora a versão inicial correspondente ao cálculo via método de pixéis tenha sido elaborada no IDRISI.

Em relação ao segundo método de cálculo, dos anéis concêntricos, é utilizada uma divisão de 45 anéis ( $n$ ) com um incremento azimutal de  $5^\circ(\alpha_i)$  (Lindberg & Holmer, 2010), que segue uma modificação da equação sugerida por Steyn, como se demonstra na equação (9).

$$SVF = \frac{1}{4n} \sum_{i=1}^n \sin \left[ \frac{\pi(2i-1)}{2n} \right] \alpha_i \quad (9)$$

onde as obstruções são avaliadas em bandas de cada anel, com a largura angular indicada por  $\alpha_i$ , no anel número  $i$  dos  $n$  considerados (Johnson & Watson, 1984).

De referir que os valores considerados nas comparações futuramente efetuadas foram os calculados pelo método de pixéis, pois é a técnica que efetivamente foi apresentada no *SkyViewFactorCalculator* e a mais atual das duas, sendo que o método dos anéis concêntricos apenas era apresentado como termo de comparação. As imagens resultantes do processo de cálculo do SVF para os locais considerados, através da ferramenta *SkyViewFactorCalculator*, podem encontrar-se no Anexo B.

Na Figura 25 são apresentados exemplos de fotografias *fisheye* conseguidas através do presente método.



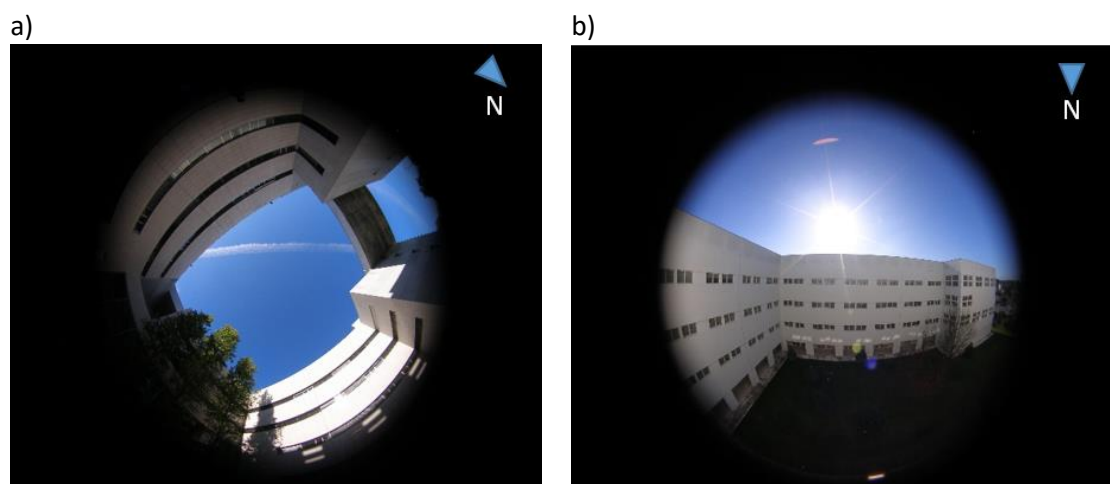


Figura 25 – Exemplo de ensaios fotográficos com a lente fisheye no a) local 5 (ponto central de um pátio, plano horizontal) e b) local 4 (fachada do edifício, plano vertical).

A Figura 25 a) foi obtida numa posição central do pátio do edifício C8 do campus da FCUL, local 5 dos 13 processados, onde se constata que toda a envolvente é perfeitamente detalhada face ao plano com que a fotografia foi captada, o plano do chão. Por sua vez a Figura 25 b) destaca uma fotografia representativa do plano de uma fachada do edifício C6, correspondente ao local 4. Em ambos os casos é denotada uma maior intensidade de brilho em determinadas zonas das fotografias, ainda que se faça sentir sob diferentes formas: no primeiro exemplo é sentida numa fachada do edifício que se encontra distintamente mais clara que as restantes, fruto da incidência de radiação direta na mesma; por sua vez no segundo exemplo, o disco solar e todo o brilho adjacente promove o contraste de uma porção de céu, alterando drasticamente a sua normal tonalidade.

Fruto de uma aquisição de dados nem sempre efetuada segundo as condições meteorológicas ideais, algumas fotografias não possibilitavam a correta distinção entre céu e obstruções pelo *software*. Assim, aquando do processamento das imagens no *SkyViewFactorCalculator*, foi necessária uma especial atenção na etapa que trata da conversão da fotografia *fisheye* numa imagem apenas a preto (obstrução) e branco (céu aberto), correspondente ao passo 3 da janela de comandos. Este, juntamente com o passo 4, consistem nas etapas mais importantes de todo este processo, uma vez que é aqui que se promove a distinção entre os pixéis relativos a obstruções e a céu aberto. Por vezes, como seria de esperar, podem ocorrer erros na diferenciação de pixéis, dando origem a uma área de céu erradamente identificada. Nesses casos, foi necessária a edição da fotografia circular original de maneira a promover um contraste mais acentuado entre os pixéis de diferentes origens que estivessem a gerar conflito. A Figura 26 apresenta um exemplo que ilustra tanto o problema acima descrito como a resolução proposta.

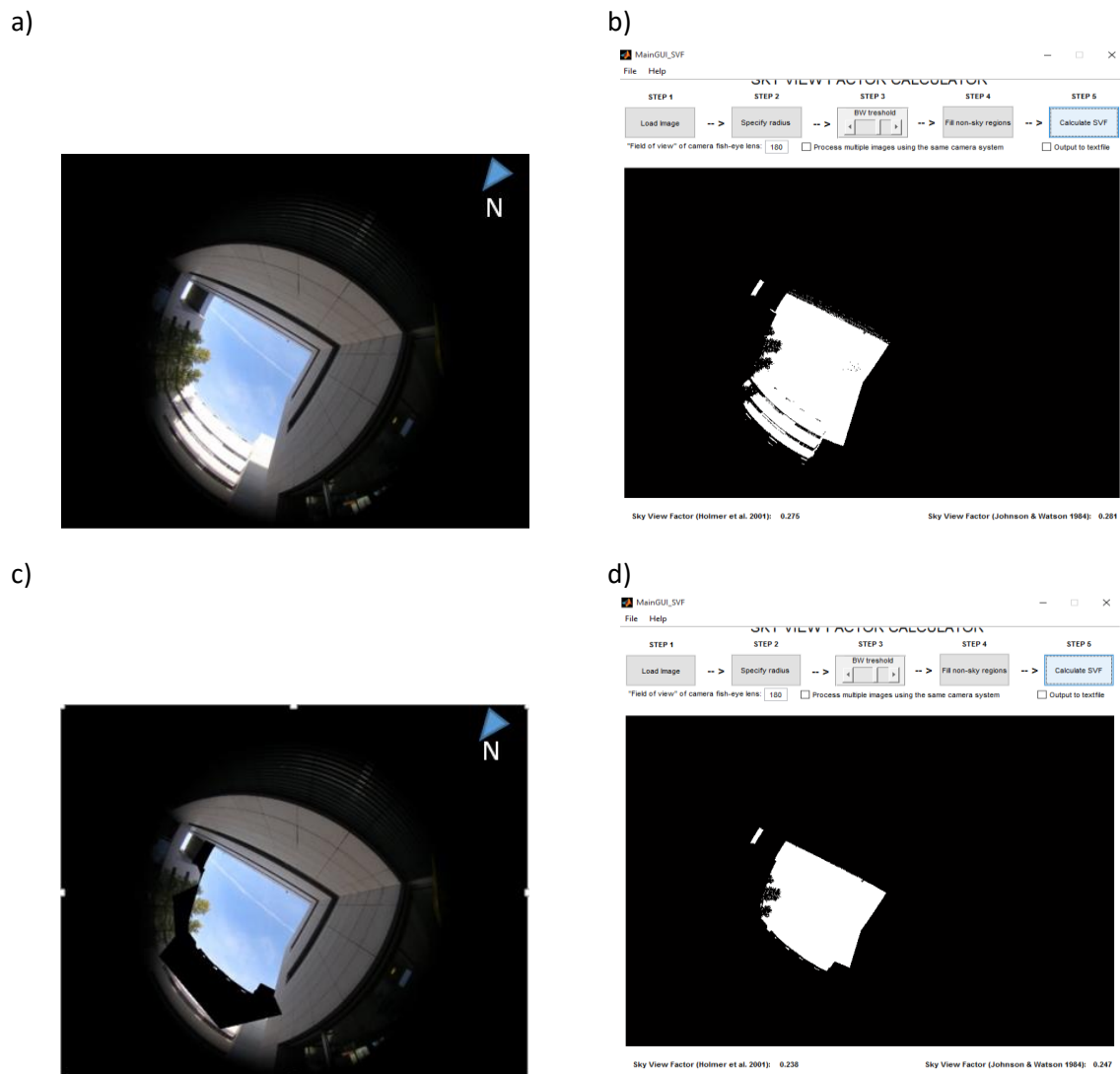


Figura 26 – Exemplo de sobre-exposição fotográfica e problemas associados: a) fachada com sobre-exposição solar, b) errada identificação de pixels de céu por parte do software SkyViewFactorCalculator, c) edição fotográfica na fachada crítica, d) correta delimitação da zona não obstruída por parte da ferramenta SkyViewFactorCalculator.

Na Figura 26 a) é visível que uma das fachadas do edifício está exposta a uma forte incidência de radiação direta, atribuindo-lhe dessa forma uma cor mais clara do que às restantes e induzindo a ferramenta de cálculo do SVF em erro, pois essa mesma fachada é identificada como se de uma área a céu aberto se tratasse, Figura 26 b). Como referido, a solução executada consistiu em pequenas alterações nas zonas críticas das fotografias, Figura 26 c), onde às fachadas que apresentavam uma tonalidade mais clara foi imposta uma sobreposição forçada com a cor preta. Era por fim importada de novo para o *SkyViewFactorCalculator* a fotografia *fish-eye* já editada, onde a correta delimitação das obstruções já era identificada com facilidade por parte do *software*, Figura 26 d). Relativamente ao caso demonstrado na Figura 25 b), onde a zona da fotografia com níveis de brilho mais elevados corresponde ao disco solar e à sua envolvente, o *software* não teve quaisquer dificuldades em delinear de forma correta a fronteira obstrução/céu aberto, não sendo assim necessária qualquer edição na imagem inicial. No entanto, caso essa intervenção fosse exigida, o processo passaria por uma abordagem semelhante à descrita anteriormente, desta feita forçando a zona crítica do céu à cor branca. Outra hipótese para evitar os problemas associados à sobre-exposição mencionada seria efetuar ensaios fotográficos em diferentes horas do dia, acreditando que mais registos do

mesmo local iriam permitir a obtenção de pelo menos um com as condições pretendidas. Todavia, este caminho conduziria inequivocamente a um processo de aquisição e tratamento de dados mais demorado e dispendioso.

Em contrapartida, as dificuldades encontradas pelo *software* em reconhecer corretamente obstruções foram mais frequentes em situações de sobre-exposição, como exemplificado na Figura 26, do que propriamente devido à complexidade da envolvente, como se mostra na Figura 27 a).



Figura 27 – a) envolvente complexa com diversidade de elementos presentes, b) correta identificação da zona desobstruída.

Acima encontra-se um exemplo de uma fotografia onde a linha do horizonte se pode considerar complexa, contendo uma diversidade de elementos muito superior à vista no exemplo anterior (Figura 26). No entanto, na Figura 27 b) é visível a quase perfeita delineação de todos os detalhes, sejam eles edificações irregulares e com pequenas saliências, ou mesmo vegetação, como é o caso da típica forma de uma palmeira.

Algumas considerações a ter após o tratamento das imagens prendem-se com a própria lente *fisheye* utilizada, a Nikon FC-E8, que é um equipamento que não reúne consenso no que ao campo de visão possibilitado diz respeito. Segundo as especificações da própria Nikon, a lente aponta para um campo de visão de aproximadamente 183° (Nikon, 2014), enquanto em Grimmond et al. (2001) o valor reportado após alguns testes de calibração tenha sido superior, 189°, indo de encontro aos 187° sugeridos por Bauer (2001). Devido à desigualdade de valores mencionada, foi, ainda na investigação acima referenciada, efetuada uma comparação de SVF provenientes de imagens capturadas tanto com um campo de visão limitado a 180° como também para o valor máximo proporcionado, os 189°, resultando da mesma um erro médio absoluto de 0.022 (Grimmond, Potter, Zutter, & Souch, 2001). Na medida em que o erro apresentado assume um valor muito pouco significativo, optou-se por se assumir no presente estudo que as fotografias adquiridas iriam considerar um campo de visão de 180°. Assim, na opção disponibilizada no *SkyViewFactorCalculator* relativa à definição deste detalhe da lente utilizada, o valor definido foram os 180° assumidos, valor considerado o ideal para as investigações no campo da análise de obstruções e o mais coerente para a aquisição do parâmetro SVF o mais real possível.

### 3.3 Recetores GPS

#### 3.3.1 Equipamento

O equipamento usado nesta fase do estudo foi um recetor GPS de fácil portabilidade e utilização, vulgarmente utilizado para atividades de exterior, como por exemplo Geocaching, BTT ou qualquer outra que recorra ao auxílio de rotas. O modelo em causa foi o eTrex 30, da Garmin, que tem como mais-valia a possibilidade de receber sinais da frota de satélites russos, GLONASS, em simultâneo com os sinais da frota GPS. Com essa adição de satélites o tempo que o recetor demora a definir uma posição é, em média, 20% mais rápido do que se fosse utilizado apenas o sistema GPS (GARMIN, 2016). Para a vertente do estudo proposto, que passa pela estimativa de SVF, é esperado que com um maior número de satélites disponíveis a fidelidade das estimativas seja também maior.

#### 3.3.2 Aquisição e tratamento de dados

O levantamento da informação alvo deste método, que se baseou no número de satélites disponíveis e no parâmetro SSI (que caracteriza a intensidade do sinal) registado no recetor GPS, foi executado em dois passos distintos:

- Previsão de satélites disponíveis;
- Recolha de dados.

O primeiro passo mencionado foi dedicado à consulta prévia de quais satélites iriam estar presentes no hemisfério, ao longo do dia em que iria ser feita a recolha dos dados. Para a metodologia que se pretende implementar, cujo conceito passa por assumir que a intensidade do sinal recebido é tanto maior quanto menor for o grau de obstrução da envolvente, é essencial que os satélites se encontrem dispersos pelo hemisfério da forma mais uniforme possível, por forma a garantir que a informação que o recetor deteta cobre todo o horizonte e, possivelmente, todas as obstruções possíveis. A localização dos satélites foi consultada no *site* <https://in-the-sky.org>. Esta ferramenta *online* permite a visualização da rota dos satélites, GPS e GLONASS, a nível global ou apenas na cúpula hemisférica acima do local selecionado, tanto em tempo real como em datas anteriores à pesquisa, ou até dois dias após a mesma.

Na Figura 28 encontra-se um exemplo retirado para o dia 4 de Março de 2016 em Lisboa, onde é possível observar a posição dos satélites às 9h, sendo os sistemas GPS discriminados por “GPS” e os GLONASS por “COSMOS”, cada um associado a um número de identificação diferente. Para cada um dos satélites é também fornecida a sua altitude e azimuth. Foi compilada toda essa informação com detalhe horário sobre todos os azimutes e altitudes relativos a cada satélite presente na cúpula hemisférica, no intervalo temporal entre as 8h e as 19h. Foi aplicado um filtro onde todos os satélites com altitude inferior a 10° foram ignorados, com base no pressuposto de que os sinais recebidos por parte do recetor respeitantes a estes satélites iriam ser demasiado fracos, pois os satélites já estariam muito próximos do horizonte e facilmente sofreriam degradação do sinal. Recorrendo às coordenadas compiladas, foram feitos alguns testes, sob forma de gráficos polares em ambiente MATLAB, nos quais eram representadas as localizações dos satélites ao longo de várias horas do dia com a finalidade de se perceber se a distribuição acumulada ao longo do dia iria aproximar-se da homogeneidade pretendida ao longo do hemisfério, como se pode visualizar na Figura 29.

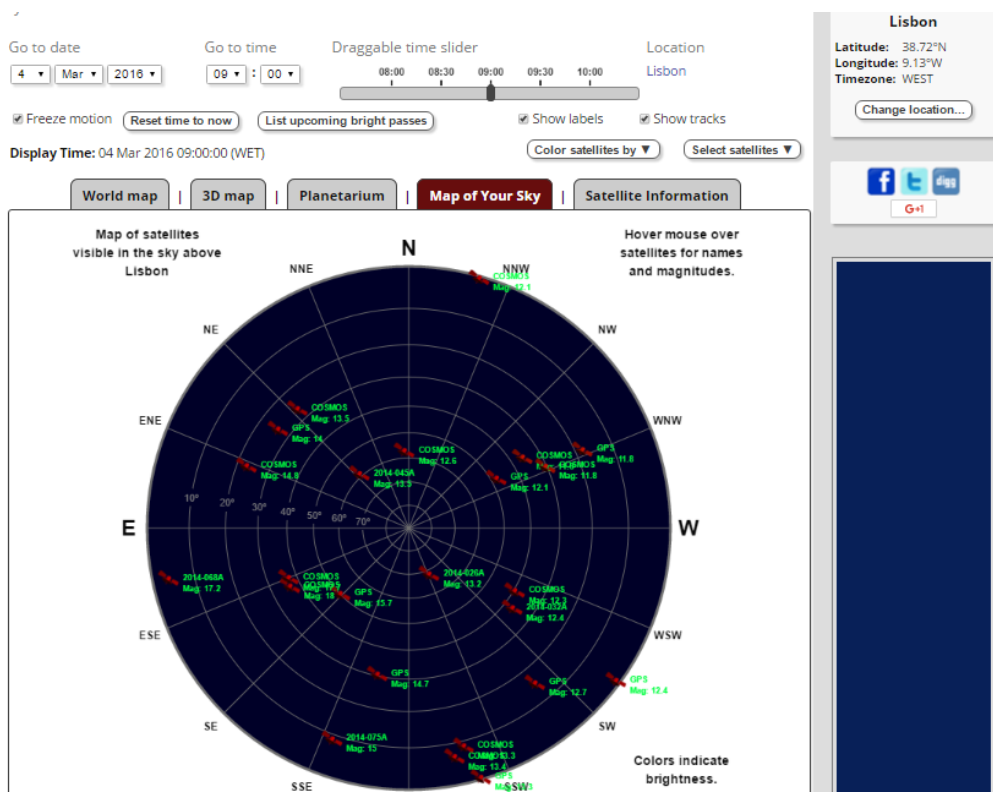


Figura 28 – Página web que permite o display da posição das frotas de satélites em tempo real (In-The-Sky.org, 2016).

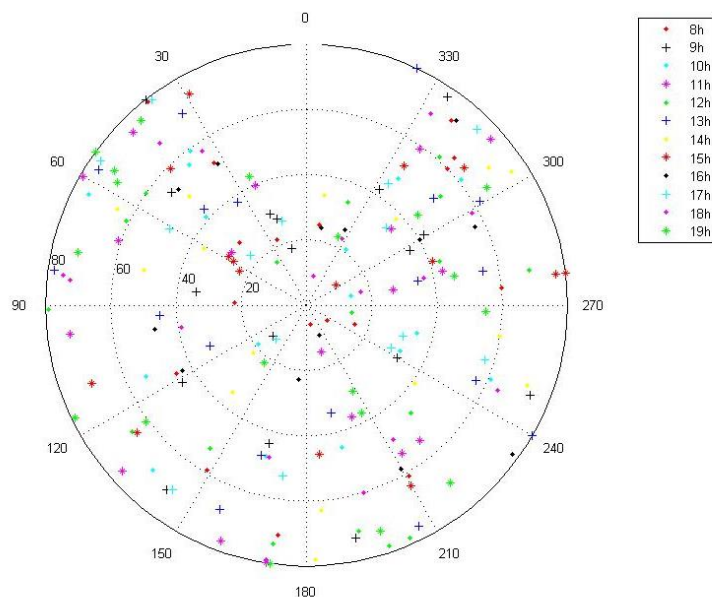


Figura 29 – Gráfico polar representativo da dispersão homogénea de satélites ao longo de um período de dez horas.

É visível na Figura 29 o filtro para altitudes inferiores a  $10^\circ$  na limitação da escala de ângulo zenital até aos  $80^\circ$ . É também perceptível que ao longo do dia os satélites se encontram bem distribuídos ao longo do hemisfério, tal como desejado, permitindo assim uma maior confiança nos indicadores obtidos em função da envolvente dos locais onde se iam realizar as medições.

Ainda na mesma figura pode ver-se claramente definida a única zona não coberta pelas rotas dos satélites, na zona dos 60° de azimute mais próximos do norte geográfico.

Depois da compilação de informação teórica, realizou-se a recolha experimental das grandezas desejadas no local. A abordagem passou por um levantamento intensivo dos sinais GPS recebidos pelo recetor ao longo de dez horas, nos 13 locais definidos, alcançando desta forma uma amostra de dez registos por local. As medições ocorreram entre as 8h da manhã e as 19h da tarde, não tendo sido recolhidos os valores relativos aos ensaios das 9 e 13h. Esta prática foi adotada com o objetivo de garantir, ao fim de todas as medições, uma boa dispersão de satélites, evitando desta forma que áreas significativamente grandes do hemisfério não facultassem qualquer registo. O facto de se terem feito tantas repetições serviu também para perceber se esta técnica necessita de vários levantamentos ou se bastaria ir fazê-lo uma única vez, testando desde logo a reprodutibilidade deste método. Esta abordagem toma um carácter análogo à proposta de efetuar registos fotográficos em diferentes horas do dia, sugerida na subsecção 3.2.2, na medida em que se espera que um maior número de registos aumente a representatividade do método face ao que seria conseguido com um levantamento isolado.

Um aspeto importante a ter em conta foi o tempo de estabilização do recetor, que diferiu de acordo com o nível de obstrução que caracterizava a envolvente. Para locais mais descobertos os tempos rondaram os 40 segundos, enquanto para locais com uma maior densidade de obstruções foram quase sempre necessários cerca de 70 a 80 segundos. Após a estabilização indicada o registo dos satélites e respetivos SSI foi conseguido através da opção de *screenshot* disponibilizada pelo próprio recetor, como se observa nos exemplos apresentados na Figura 30.

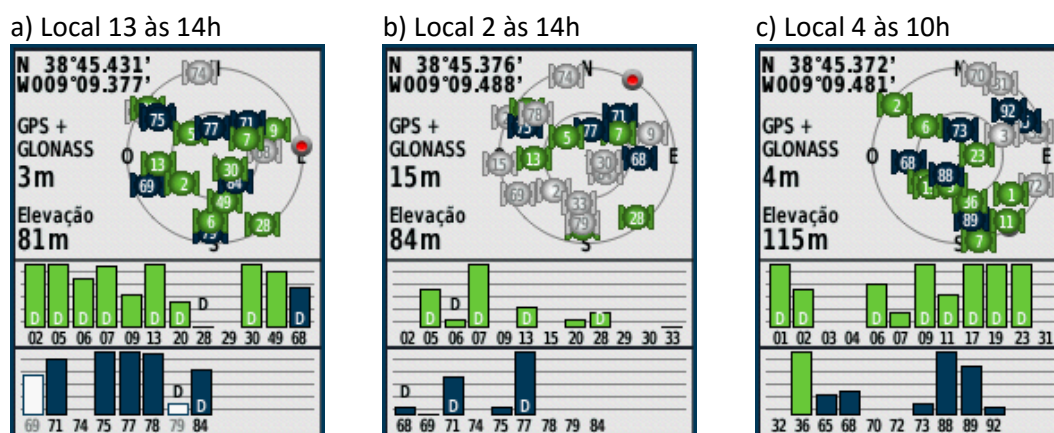


Figura 30 – Screenshot do recetor GPS utilizado em presença de: a) alta intensidade de sinal e abundância de satélites disponíveis, b) baixa intensidade de sinal e c) divisão hemisférica de ensaio numa fachada.

Nos três registos ilustrados, a dispersão de satélites é visivelmente distinta, onde os satélites verdes correspondem à frota GPS e os azuis à GLONASS. Acima estão identificados alguns dos tipos de disposição de satélites que ao longo dos ensaios foram surgindo: na Figura 30 a), que corresponde ao local 13, é perceptível uma boa dispersão de satélites ao longo de todo o plano hemisférico, consequência do baixo grau de obstrução que define o local em questão; Figura 30 b) é notória diminuição do número de satélites disponíveis bem como a intensidade de sinal dos mesmos, em virtude do algo grau de obstrução do local em causa; já na Figura 30 c), local 4 ilustrado na Figura 20 representativo de uma fachada, é visível uma divisão do hemisfério a nível da localização de satélites, excetuando dois satélites GLONASS que estão para lá da separação entre os dois aglomerados, representando de forma bastante perceptível que parte do hemisfério está obstruída pela própria fachada. De referir que a obtenção de dados



representativos das fachadas foi conseguida nas janelas presentes nas mesmas. Tal como executado para o processo do método fotográfico, o recetor foi mantido no exterior no plano da própria fachada através da abertura possível por parte das janelas, até que a estabilização pretendida fosse alcançada, o que demorou cerca de 1 minuto.

As grandezas alvo da análise foram o SSI e o N, pelo que o primeiro passo executado consistiu na interpretação dos *screenshots* de forma a ser feita uma diferenciação entre os vários tipos de barras que eram apresentados. Como se pode observar na Figura 30 a), existem três tipos: as barras preenchidas (coloridas), as vazias (brancas) e as com valor zero (apenas um traço). Enquanto as primeiras eram normalmente contabilizadas, dentro do intervalo característico de 0-10 que descreve o SSI, as segundas não foram. O facto de não estarem preenchidas significa uma forte interferência de ruído no sinal que, desta forma, fica sem qualidade suficiente para ser lido pelo recetor. Nestas situações, algumas vezes provocadas por arborização presente no local, as barras ficam a piscar de forma intermitente, tal como as figuras dos satélites que lhe estão associados, demonstrando assim a instabilidade do sinal. No caso das barras com valor zero (exemplo da barra correspondente ao satélite 28 da mesma figura), esse nulo foi contabilizado, pois presumiu-se ser um bom indicador de uma possível obstrução naquela direção.

Depois de diferenciadas as barras e definidas quais seriam ou não contabilizadas, seguiu-se o registo do valor de SSI e do N. O valor de cada barra era determinado com o auxílio das linhas apresentadas nas capturas de ecrã, sendo a primeira correspondente ao valor 1, de dois em dois, até à última linha que toma o valor 9. Tanto o valor máximo como o mínimo, 10 e 0, são contabilizados quando as barras se posicionam distintamente acima da linha de valor 9 e abaixo da linha de valor 1, respetivamente, como são exemplos as barras 5 e 28 na Figura 30 a). Quanto às barras que se posicionam entre linhas, caso não se encontrem exatamente no ponto médio entre as duas, foi feita uma contabilização por defeito, tomando dessa forma o menor dos valores entre as linhas em questão. O número de satélites disponíveis, N, foi contabilizado em função do número de barras admitidas como válidas.

A informação foi compilada em formato de tabelas que discriminavam detalhadamente os valores de SSI e N observados por hora em cada local que, aliadas à informação de localização dos satélites anteriormente recolhida, permitiram a elaboração de gráficos de dispersão como o que é mostrado na Figura 29, onde se apresentam os valores de SSI dispostos junto do respetivo satélite. Foi também calculado o rácio entre o somatório do SSI de cada satélite e o N, com o intuito de se criar um indicador capaz de se correlacionar com o SVF do local:

$$SVF \propto \frac{\sum SSI}{N} \quad (10)$$

Este rácio foi calculado para cada uma das horas em que os levantamentos foram obtidos, bem como para o total acumulado das mesmas. Mais à frente será discutida a variabilidade entre os diferentes ensaios realizados e a sua comparação relativamente ao método fotográfico de referência

### 3.4 Raytracing com MDS

O terceiro método estudado, o algoritmo de *raytracing* incluído no modelo SOL para cálculo do SVF, foi aplicado no MDS respeitante ao campus da FCUL. Dada a natureza iterativa característica do desenvolvimento de ferramentas computacionais, apesar de já existirem

resultados relativos ao SVF neste MDS, relacionados com o estudo levado a cabo em (Redweik, Catita, & Brito, 2013), foi necessário realizar novas simulações com a versão mais atual do modelo SOL (Figura 14).

Com vista à comparação de resultados face aos conseguidos no método fotográfico *fisheye*, foi necessária a identificação no MDS dos pontos mais próximos dos locais reais onde efetivamente foram feitos os levantamentos fotográficos (i.e. os 13 locais selecionados do total de 86 locais fotografados). De forma a tentar extrair os pontos com a maior exatidão possível, foi elaborado um processo de localização relativa. Isto é, para cada um dos 13 locais selecionados, foram gravadas as coordenadas do ponto no MDS considerado o exato local onde foi captada a fotografia *fisheye* e calculada a média com os valores de SVF dos 8 pontos circundantes, de modo a minimizar uma eventual escolha de célula deslocada. Na Figura 31 é apresentado o exemplo de como foi realizado este processo para o local 2, onde é notória a variabilidade que existe entre os 8 pontos adjacentes ao central.

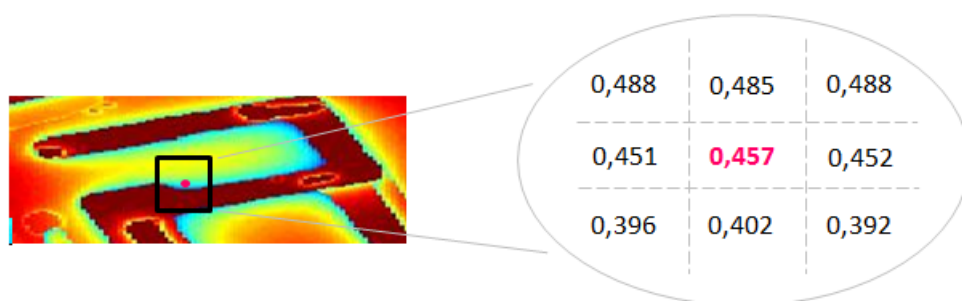


Figura 31 – Processo de localização relativa do SVF de 1 ponto recorrendo aos 8 valores de SVF circundantes.

Tal como descrito na subsecção 2.4.2, a divisão hemisférica neste modelo considera 1081 pontos distribuídos de forma equiangular (Figura 32 d). Porém, dado o elevado tempo de execução decidiu-se testar diferentes distribuições de pontos, apresentadas na Figura 32, de forma a averiguar uma potencial variação na precisão dos resultados e/ou possível redução do tempo de computação.

As novas divisões hemisféricas consideradas eram compostas por 145 pontos (Figura 32 a), que corresponde à referência da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (Tregenza, 1987), 290 (Figura 32 b) e 400 (Figura 32 c). As principais diferenças entre os 4 modelos constam na manutenção de um número constante de pontos por banda zenital nos modelos de 1081 e 400 pontos, que promove uma maior concentração de pontos na zona central da cúpula hemisférica, face ao número variável nos modelos de 290 e 145 pontos. A outra distinção entre os dois grupos de modelos mencionados trata-se da diferença entre a altitude da primeira banda de pontos presente nos modelos de 290 e 145 ( $6^\circ$ ) em contraste com os  $14^\circ$  e  $15^\circ$  dos modelos com 400 e 1081 pontos, respetivamente, promovendo assim uma diferença significativa no preenchimento dos extremos hemisféricos.



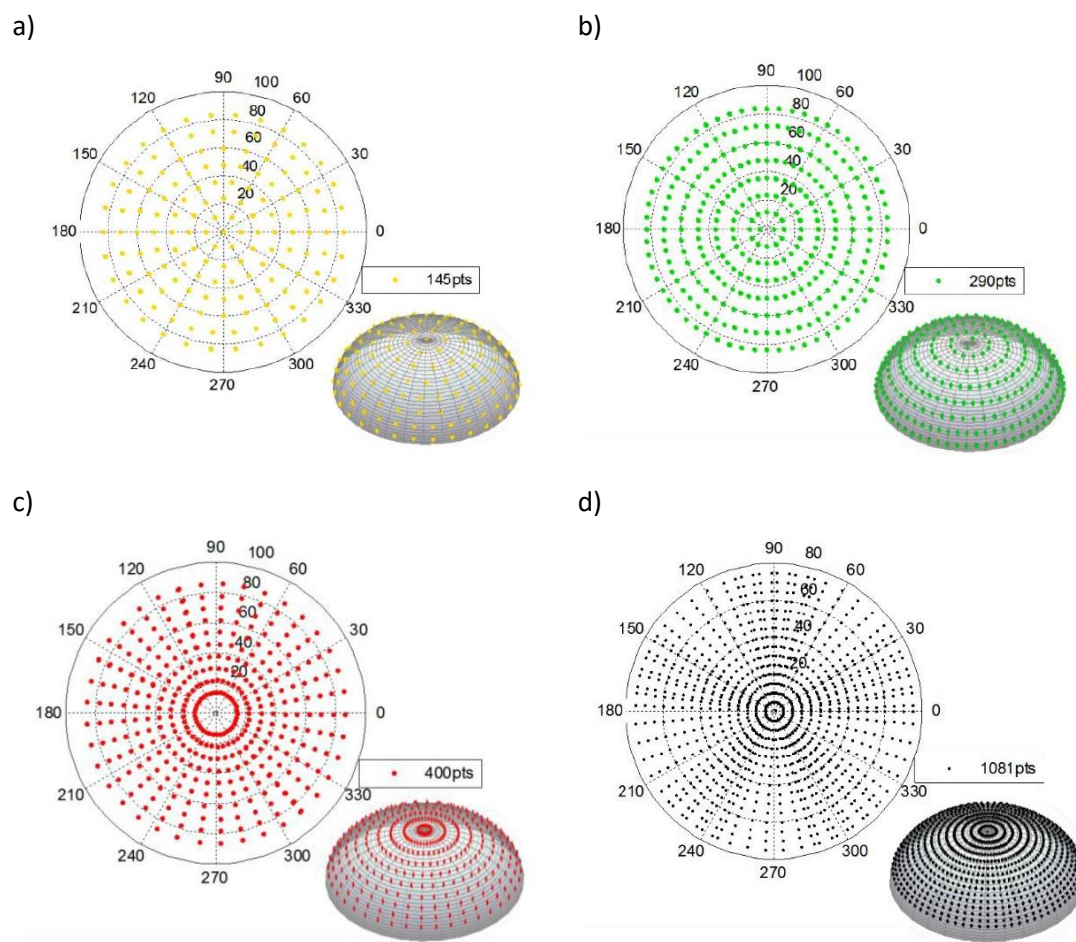


Figura 32 – Diferentes modelos de divisão hemisférica considerados : a) 145, b) 290, c) 400 e d) 1081 pontos.



## 4. Resultados e Discussão

Para uma concreta definição das diferenças registadas nos resultados alcançados pelas diferentes metodologias desenvolvidas na presente dissertação, foram definidos quais os valores a tomar como referência para as comparações que se seguem. Os valores de SVF obtidos segundo o método fotográfico *fisheye*, indicados individualmente para cada um dos 13 locais fotografados, encontram-se no Anexo C.

### 4.1 Fisheye vs GPS

De forma a exemplificar a variedade de elementos retratados ao longo dos ensaios, a Figura 33 apresenta dois tipos de envoltórios distintos: um local ladeado por edifícios altos (local 6) e outro caracterizado por um baixo grau de obstrução (local 13).

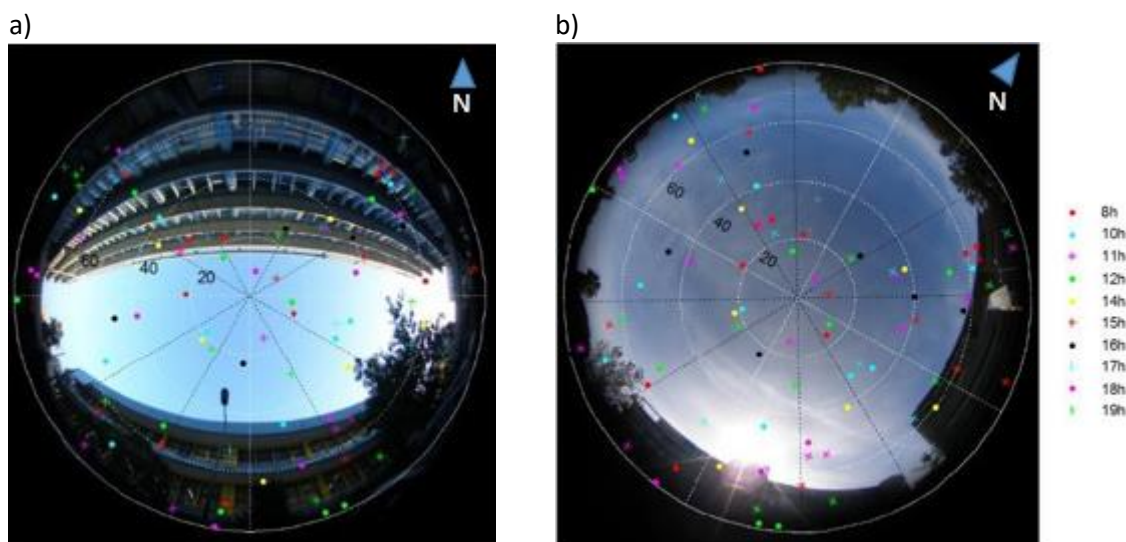


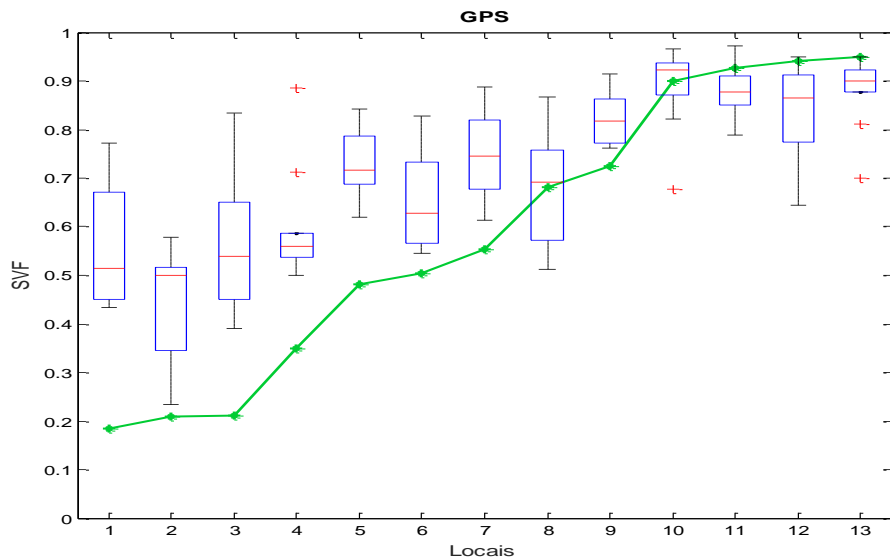
Figura 33 – Dispersão de satélites ao longo de dez horas no local a) 6 e b) local 13.

Como se pode observar na Figura 33, foi forçada sob as imagens *fisheye* uma sobreposição da distribuição de satélites durante as 10 horas em que os levantamentos foram executados, onde pode ver-se uma disposição de satélites uniformemente espalhada no plano hemisférico, excetuando a zona direccionada a Norte não coberta pela própria rota dos satélites. Na Figura 33 a), local 6, o SVF *fisheye* ronda o valor de 0.50, face ao 6.61 alcançado através do índice SSI/N. Já no local 13 representado na Figura 33 b), tem-se SVF *fisheye*=0.94 e SSI/N=8.80. Os resultados apresentados recorrendo ao índice SSI/N, para ambos os exemplos acima exibidos, são uma média dos SSI/N das 10 horas recolhidas. Com o intuito de considerar a variabilidade a que esta metodologia está associada, assim como a possibilidade de uma representação tanto do SVF como do SSI/N na mesma escala de valores, foi elaborada uma normalização do índice SSI/N face ao seu valor máximo (=10):

$$\frac{SSI}{N}_{norm} = \frac{SSI}{N} / 10 \quad (11)$$

Através deste novo índice, que respeita a gama de valores 0-1, a variabilidade dos dados satélite foi representada em diagramas de caixa, onde os valores apresentados mostram a distribuição dos valores horários de cada local dos 13 em estudo, como se observa na figura que se segue.

a)



b)

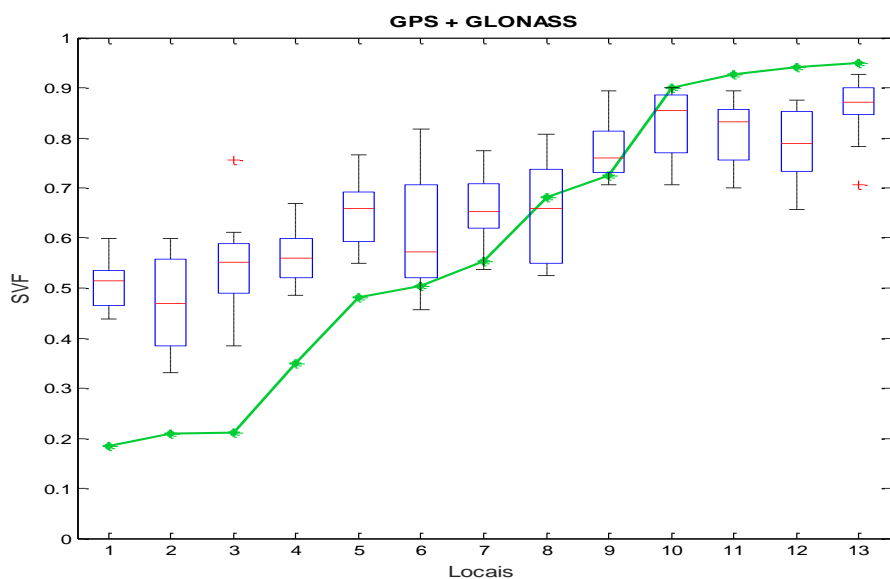


Figura 34 – Boxplots ilustrativos do índice  $(SSI/N)_{norm}$  e comparação com valores SVF fisheye (linha verde) com recurso: a) exclusivamente à frota GPS e b) com recurso a GPS+GLONASS.

Analisando a Figura 34, independentemente de ser considerada ou não a contribuição da informação proveniente da frota GLONASS, é clara a variabilidade apresentada ao longo dos ensaios realizados, fazendo-se sentir com maior amplitude nos locais com maior nível de obstrução, ou seja, com SVF menor que 0.7. Em ambos os casos existe uma forte tendência para sobrestimar o real valor de SVF quando o mesmo é menor que 0.5, como se constata nos locais 1 a 5. Em contrapartida, nos locais em que o nível de obstrução é mais baixo, pode ver-se uma inversão dessa tendência, dando lugar à subestimação dos valores SVF fisheye nos locais 11 a 13 (SVF superior a 0.9), apesar desse desvio não se fazer sentir com tanta

intensidade quanto a sobrestimação nos locais mais obstruídos. Relativamente aos locais intermédios, 6 a 10, ainda que não se observem estimativas extremamente próximas dos valores de SVF, pode afirmar-se que os valores da mediana de SSI/N (traço encarnado dentro das caixas) se correlacionam de forma aceitável com o gradual aumento do SVF para esses locais, como se observa com maior nitidez na Figura 34 b). De todos os locais avaliados, é no local 8 que se encontra a mediana de SSI/N com maior proximidade do SVF *fisheye*, tanto no cenário onde apenas a informação GPS é contabilizada como também quando se acumula a respeitante à frota GLONASS, Figura 34 a) e b). A análise previamente elaborada é novamente confirmada na Figura 35, onde são apresentados os valores de mediana acima registados em função do valor SVF *fisheye* obtido.

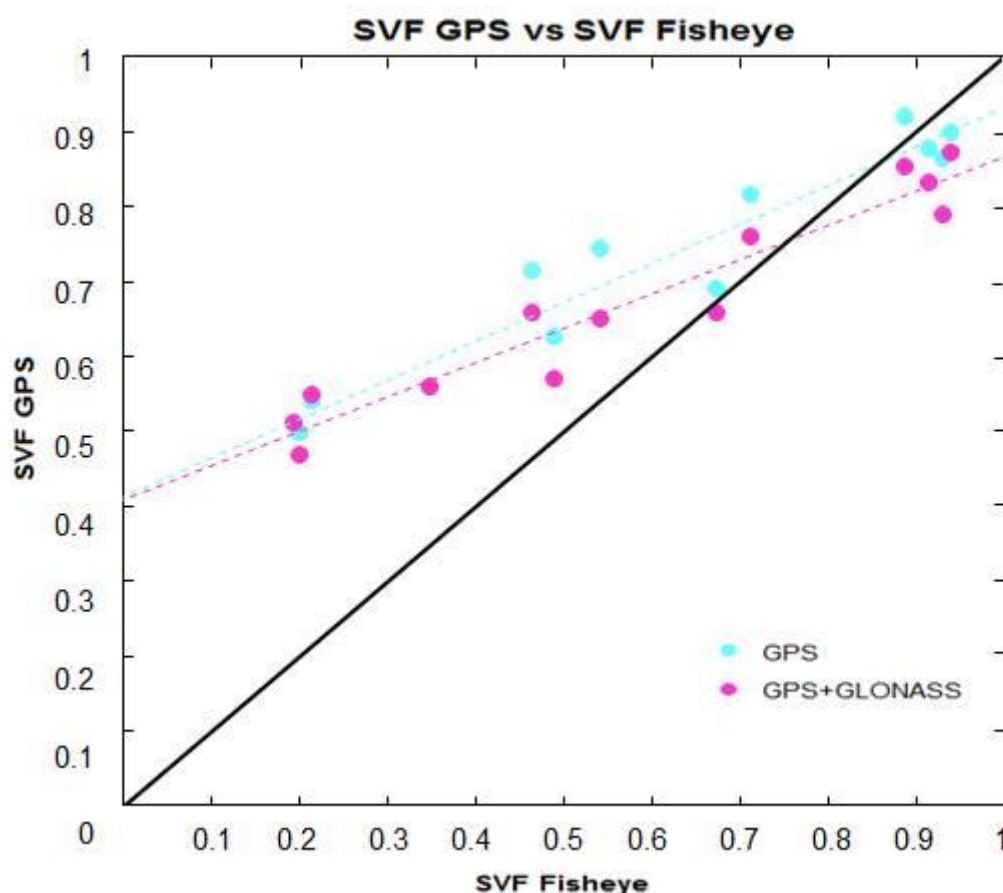
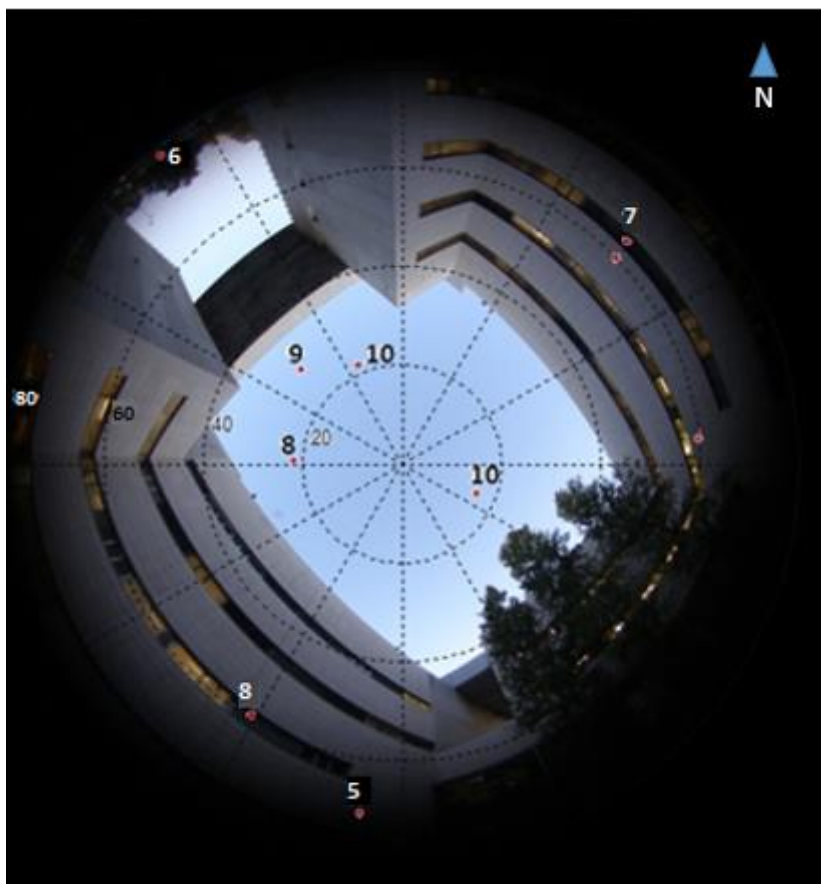


Figura 35 – SVF relativo à abordagem GPS em função do valor SVF *Fisheye*.

Mais uma vez são evidenciadas as notórias sobrestimações sentidas nos locais de maior obstrução, sendo essa tendência invertida quando uma maior área de céu se encontra disponível, embora neste último cenário as estimativas se aproximem significativamente dos valores SVF *fisheye*.

Possíveis explicações para as diferenças registadas, nomeadamente para os locais com maior nível de obstrução, poderá ser o fenómeno de reflexão das ondas eletromagnéticas associadas ao sinal GPS nas envolventes, sendo a refletividade dependente do material que constitui as diversas superfícies, âmbito esse focado na reflectometria GNSS (Global Navigation Satellite System) (Jin & Komjathy, 2010). Num local com SVF menor, e consequentemente maior grau

de obstrução, o recetor pode estar a captar sinal refletido em obstáculos que supostamente o deviam bloquear, como se observa na Figura 36.



*Figura 36 – Fenómeno de reflexão do sinal GPS dentro de um pátio com envolventes altas.*

Estão representados a vermelho, sob forma de um gráfico polar, os satélites presentes na cúpula hemisférica aquando do ensaio realizado às 8 horas. Os mesmos foram sobrepostos numa fotografia *fisheye*, com o respetivo valor de SSI ao lado indicado, com o intuito de exemplificar as reflexões sugeridas. Esse fenómeno é aqui apresentado tendo por base a atribuição de sinais, com valor de intensidade alto (SSI's de 8, 7 e 5), a satélites que deviam estar a ser obstruídos pela envolvente do pátio. Assim, o índice SSI/N para o ensaio das 8 horas, alcançado exclusivamente com o contributo dos sinais aqui representados, tomou o valor de 7.88, consideravelmente acima do 0.48 encontrado com recurso ao método *fisheye*, indo de encontro à sobrestimação típica registada nestes casos. Em relação aos locais com menor nível de obstrução, nos quais se verificou uma subestimação do efetivo valor de SVF, a origem pode estar numa disposição pouco representativa dos satélites captados. Uma vez que esta técnica em nada pondera a direção de onde os sinais estão a ser captados, as poucas obstruções presentes em locais de SVF alto podem estar a contribuir com um peso excessivo para a estimativa final, originado dessa forma a subestimação assistida. Apesar de no período total dos ensaios essa mesma distribuição ter sido homogénea, como é exemplo a Figura 33, os levantamentos horários podem não ter uma distribuição igualmente relevante. A falta de cobertura no quadrante Norte, que também pode ser visualizada na figura anterior, pode também ter contribuído para este fator. No que às condições climáticas diz respeito, apesar de ao longo deste estudo se terem frisado algumas vezes a importância de uma seleção do dia de

recolha de dados adequado em termos atmosféricos, as mesmas não influenciam a intensidade de sinal captada pelo recetor (Haase, Ge, Vedel, & Calais, 2003).

Apesar da adição dos satélites GLONASS ter resultado numa redução da variabilidade dos registos, especialmente expressiva nos locais de maior obstrução, não se pode afirmar que os valores de mediana de SSI/N tenham ficado mais próximos do SVF *fisheye* devido a esse incremento de informação.

## 4.2 Fisheye vs Raytracing com MDS

Os SVF conseguidos com recurso ao método de *raytracing* no modelo SOL para os pontos no MDS mais próximos da realidade foram calculados utilizando 4 divisões hemisféricas distintas (Figura 32), como descrito anteriormente, e foram comparados com os valores SVF *fisheye*, como é ilustrado na Figura 37.

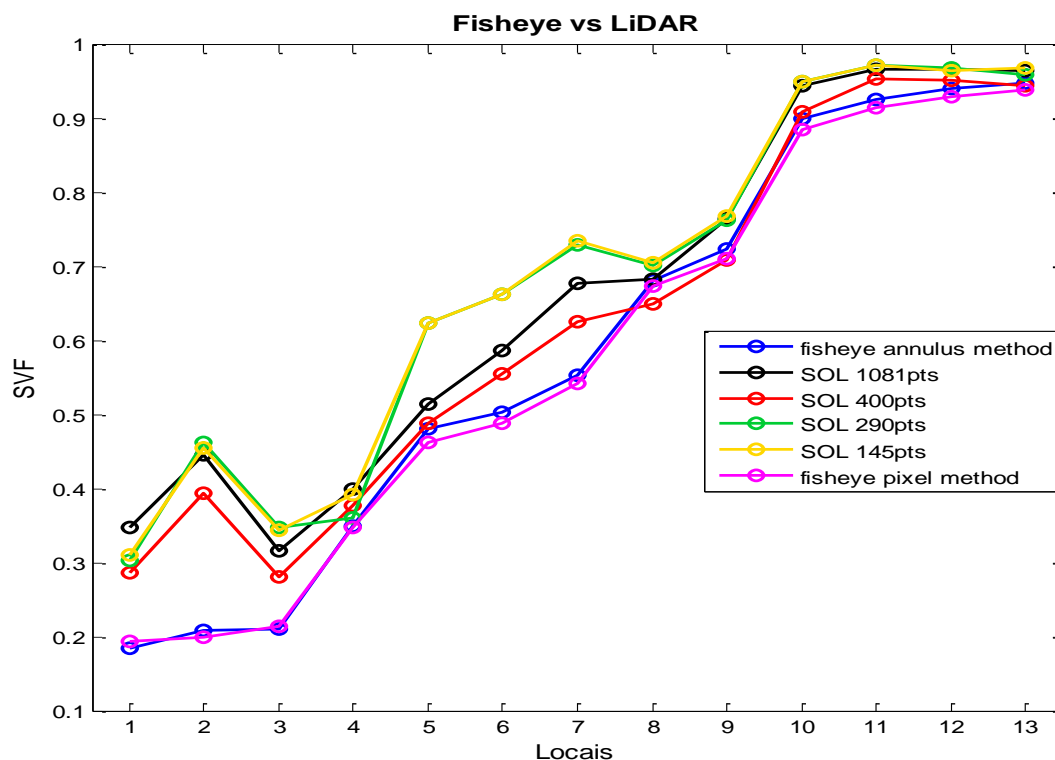


Figura 37 – Comparação dos valores SVF *fisheye*, conseguidos através dos métodos de pixel e anéis concêntricos, com os valores SVF do algoritmo SOL, recorrendo às 4 divisões hemisféricas do método de raytracing segundo dados LiDAR.

Numa primeira análise à figura exibida é notória a sobrestimação dos SVF dos locais 1, 2 e 3 (todos numa fachada do edifício C6: primeiro andar da fachada, canto exterior do pátio, primeiro andar da fachada, respetivamente), independentemente da divisão hemisférica considerada. Em qualquer um destes casos, o MDS que suporta todos os cálculos está limitado a poucos metros além da fachada do edifício, podendo desta forma não contabilizar as devidas obstruções causadas pela vegetação presente no local e assim promover a sobrestimação observada. O facto de o MDS ter resultado de uma reamostragem dos levantamentos LiDAR, para a resolução de 1m<sup>2</sup>, pode também impedir a devida exatidão na representação dos



elementos obstrutores. Relativamente aos pontos centrais apresentados na Figura 37, locais 5, 6 e 7, também se observa uma sobrestimação dos valores gerados pelo algoritmo SOL, embora neste caso já se note uma maior aproximação dos modelos de 400/1081 pontos aos valores *fisheye*. Já nos locais onde o SVF é superior a 0.6, locais 8 a 13, pode observar-se uma concordância de resultados assinalável entre os quatro modelos considerados, acentuando-se de forma ainda mais vincada em locais com nível de obstrução muito baixo, como se destaca na Figura 38.

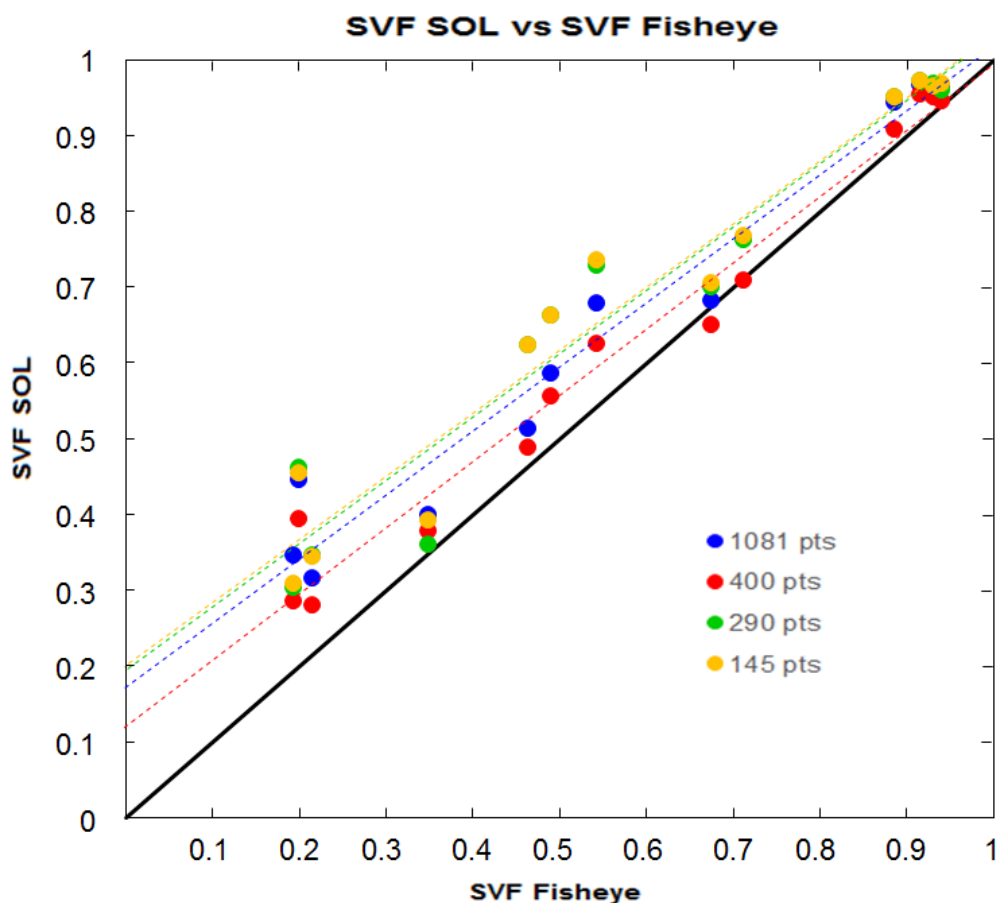


Figura 38 – SVF relativo ao algoritmo SOL (método de raytracing) em função do valor SVF Fisheye.

Numa perspetiva menos geral, existem alguns locais que merecem uma especial atenção em função do comportamento registado, que podem ser visualizados na Figura 39:

**Local 2:** é um local que se encontra num canto de um pátio e que se caracteriza pela sua extrema proximidade às paredes do edifício. É o local onde provavelmente se regista a maior diferença entre os SVF gerados pelo SOL e os SVF *fisheye*, o que pode indicar mais uma vez que a resolução de 1m<sup>2</sup> utilizada no MDS pode não ser suficiente para uma análise tão próxima de fachadas.

**Local 4:** faz parte de uma fachada, tal como os locais 1 e 3, embora a precisão aqui registada em nada se pareça com a sobrestimação assinalada nos outros dois pontos. Uma vez que este local se encontra no último andar do edifício, ao contrário dos outros que pertencem ao andar mais baixo, poderá ser possível uma atribuição



defeituosa de alturas nos hiperpontos das fachadas que está na origem dessa ausência de sobrestimação.

**Local 5:** ao contrário do local 4, aqui seriam esperados valores mais baixos que os *fisheye*, na medida em que o MDS criado, fruto de um levantamento LiDAR, não contabiliza a abertura existente no edifício, pois considera que a área abaixo da pala seria toda preenchida.

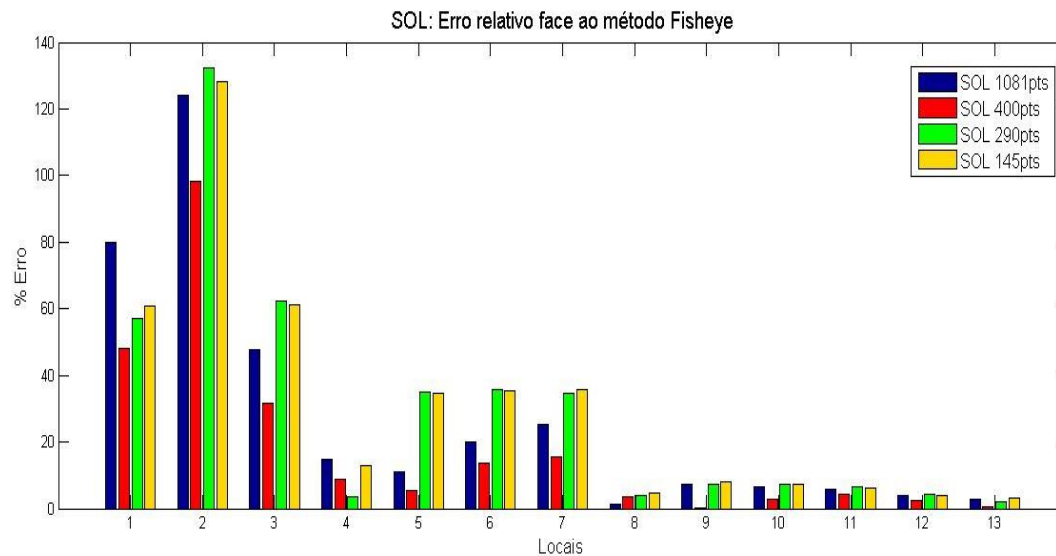


Figura 39 – Locais a) 2, b) 4 e c) 5 dos 13 fotografados.

Contrariamente ao que se observa na maioria dos registos, nos locais 5, 6 e 7 dá-se uma separação dos valores originados pelo modelo com uma divisão hemisférica de 145 e 290 pontos face aos com 400 e 1081 pontos, Figura 37. A principal diferença entre os dois grupos prende-se com o facto de nos modelos com 400 e 1081 pontos as divisões hemisféricas se manterem distribuídas de forma constante ao longo das bandas zenitais, referido em 3.4, tal como na ferramenta de cálculo utilizada para as estimativas SVF *fisheye*. Assim, em locais como o 6 e 7, os modelos de 145 e 290 pontos irão sempre estimar valores superiores aos resultantes do método *fisheye*. De realçar que nos três locais aqui analisados encontra-se vegetação relativamente próxima do local onde foi feito o ensaio fotográfico, inclusive a obstruir parte da cúpula hemisférica para além das fachadas discriminadas. Tal como já foi referido, o baixo, ou por vezes nulo, detalhe que o MDS concede à vegetação faz com que em casos como os locais em análise (5, 6 e 7) se encontre visível uma maior porção de céu face ao que se constata através do método fotográfico. O impacto de uma representação menos correta com a realidade acentua-se quanto menor for a resolução espacial da malha digital urbana.

De modo geral, o modelo que assume 400 pontos espalhados pelo hemisfério parece ser o mais capaz de seguir com alguma precisão as estimativas fotográficas *fisheye*, embora obviamente esteja sempre limitado à qualidade proporcionada pelo MDS no qual todos os cálculos são baseados. Na Figura 40 a) estão representados os erros relativos das quatro simulações feitas face aos valores de SVF *fisheye* que se definiram como referência no início do presente capítulo, bem como os erros relativos atingidos com a metodologia GPS, Figura 40 b).

a)



b)

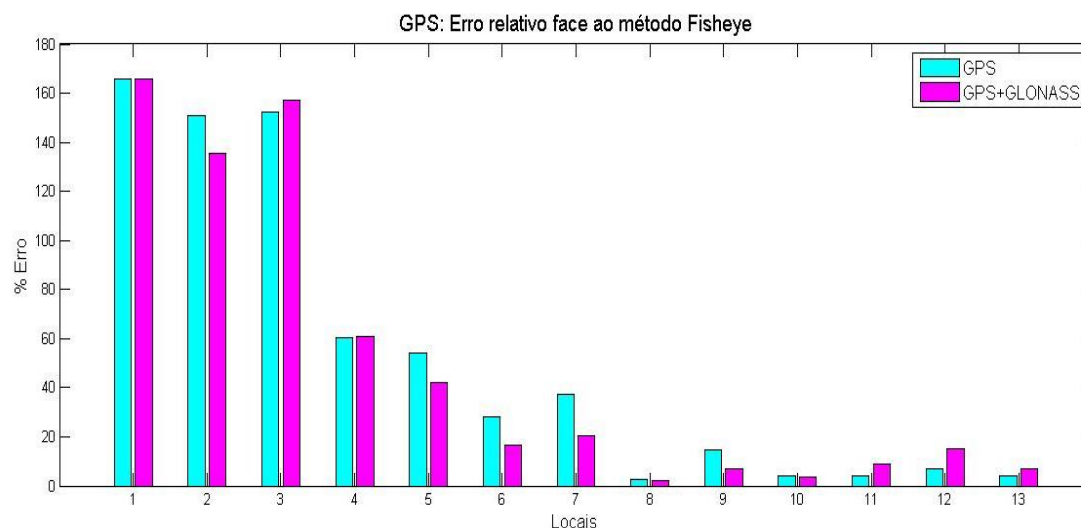


Figura 40 – Erro percentual relativo do a) algoritmo SOL (4 divisões hemisféricas), b) método GPS, face aos valores referência SVF Fisheye.

Mais uma vez pode constatar-se que o modelo com 400 divisões hemisféricas é o que melhor segue as estimativas *fisheye*, com apenas duas exceções nos locais 4 e 8, onde o modelo com 290 e 1081 pontos têm melhor desempenho. Relativamente aos erros percentuais GPS, tomam valores bastante mais elevados do que com a anterior metodologia, embora seja notada uma convergência entre as duas na redução do erro quando locais com maior SVF estão sob análise, como se constata do local 8 em diante tanto na Figura 40 a) como em b).

## 5. Conclusão

Na perspetiva de incentivar uma disseminação deste emergente vetor energético em cenários urbanos, a análise à diversidade de obstruções à radiação solar torna-se imperativa, e foi nesse sentido que o presente estudo foi elaborado. Foram realizadas abordagens com uma grande versatilidade, que se destacaram pela sua portabilidade e facilidade de aquisição de dados, como foi o caso do método fotográfico *fisheye* e também o das estimativas via recetores GPS. Além destes, foi também feito um estudo comparativo entre os procedimentos mencionados e um método de *raytracing* através de MDS com origem LiDAR.

O método fotográfico *fisheye*, que assume o papel de modelo *standard* neste campo de estudos, confirmou a capacidade de detalhe que lhe é atribuída, assegurando estimativas de SVF rigorosas independentemente das envolventes do local onde o ensaio é realizado. Apesar de ser constantemente mencionado em literatura referente a este método, que a realização dos ensaios fotográficos em condições de sobre-exposição, ou mesmo a ausência de um céu homogeneousmente nublado, representaria uma debilidade para esta abordagem, o mesmo acabou por não se verificar. Embora algumas fotografias apresentassem zonas com um brilho mais intenso do que o desejável, não significou que fossem descartadas de imediato, uma vez que nem todas sofriam distorções na linha do horizonte que impedissem uma correta avaliação do SVF por parte da ferramenta utilizada. Nesses casos, pequenas edições foram realizadas nas fotografias de forma a acentuar uma correta distinção entre elementos representativos de obstruções e área de céu aberto, para que consequentemente fosse com sucesso definida a linha do horizonte por parte da ferramenta utilizada. Contudo, a necessidade deste controlo por parte do utilizador representa a única barreira à completa automação do processo de aquisição de SVF via lentes *fisheye*.

Por sua vez, as estimativas via recetores GPS são referenciadas como um processo ao qual não se atribui o grau de precisão associado ao método fotográfico, embora tenham revelado um comportamento que se correlacionou com a variação de SVF ao longo dos 13 locais alvo. Em locais onde o nível de obstrução era alto assistiu-se a uma sobrestimação das estimativas GPS face ao valor *fisheye* obtido, comportamento que se acredita ter origem nas reflexões do sinal em obstruções presentes na envolvente. Por outro lado em locais onde o SVF *fisheye* toma valores mais altos, registou-se uma tendência para a subestimação. Independentemente do grau de obstrução em causa, os resultados da abordagem GPS revelam uma notória variabilidade no que ao índice SSI/N diz respeito.

Finalmente, os valores de SVF obtidos com o método de *raytracing* foram de encontro aos resultados das estimativas GPS para locais de alto grau de obstrução, convergindo numa sobrestimação dos mesmos, embora neste caso as diferenças registadas não sejam altas. Estes resultados demonstram a reconhecida fragilidade que os levantamentos LiDAR apresentam aquando da reprodução de obstruções com formas irregulares e inconstantes, bem como a representação de vegetação, presentes nas cidades modernas. A reamostragem que os dados LiDAR sofreram para a construção do MDS com resolução de 1m<sup>2</sup> poderá também ter contribuído para uma representação menos rigorosa da área analisada. Já nos locais de maior SVF assistiu-se a uma concreta melhoria das estimativas conseguidas, em qualquer um dos 4 modelos de divisão hemisférica testados. No entanto, o modelo que apresentou maior concordância com os valores SVF *fisheye* ao longo de todos os locais estudados foi o de 400 pontos, assegurando um melhor desempenho que o modelo inicialmente apresentado no

algoritmo SOL, que exigia um maior tempo de computação em função das 1081 fontes de luz consideradas ao longo do hemisfério.

Apesar da metodologia consistente e minuciosa implementada neste estudo, existem alguns aspetos que poderão ser melhorados de forma a dar continuidade a este trabalho, tais como: a) automatização do processo de extração e tratamento dos dados recolhidos com o recetor GPS – criação de algoritmo que permita a leitura e armazenamento dos valores de N e SSI, de forma a evitar o lento processo de leitura e filtragem de valores que se verificou para cada satélite, em cada uma das 10 horas e em cada um dos 13 locais; b) utilização de um *data logger* em simultâneo com o recetor GPS – possibilitar a aquisição de dados de forma contínua poderia suavizar a variabilidade registada nos ensaios realizados; c) aumento da amostra retratada – 13 locais podem não viabilizar representatividade suficiente para um melhor desempenho do método GPS; d) atualização dos dados LiDAR que dão origem ao MDS – elementos mais atuais, tais como novos edifícios ou vegetação, podem não estar representados em levantamentos antigos. Criação de um MDS com maior resolução face à de 1m<sup>2</sup> agora disponível.

A presente dissertação respondeu com sucesso aos objetivos a que se propôs inicialmente, na medida em que foram apresentadas metodologias secundárias face ao método fotográfico *fish-eye standard* que mostraram bons indicadores na área da estimação de valores SVF. Apesar de algumas fragilidades e menor exatidão constatadas tanto no método GPS como no *raytracing* recorrendo a MDS, ambas se posicionam como alternativas viáveis no estudo de obstruções a nível urbano quando se pretende alcançar um compromisso entre tempo de processamento e economia de recursos.

## 6. Referências

- Brasebin, M., Perret, J., Mustière, S., & Weber, C. (2012). Measuring the impact of 3D data geometric modeling on spatial analysis: Illustration with Skyview factor. *EDP Sciences*, 02001-p.1-16.
- Brauer-Burchardt, C., & Voss, K. (2001). A new algorithm to correct fish-eye and strong wide-angle-lens-distortion from single images. *Proc. IEEE Conf. Image Processing*, 225-228.
- Chapman, L., & Thornes, J. (2004). Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 21, 730-741.
- Chapman, L., Thornes, J. E., Muller, J. P., & Mcmurdoch, S. (2007). Potential Applications of Thermal Fisheye Imagery in Urban Environment. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 56-59.
- Chapman, L., Thornes, J., & Bradley, A. (2001b). Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. *Theor. Appl. Climatol.* 69, 81-89.
- Chapman, L., Thornes, J., & Bradley, A. (2002). Sky-view factor approximation using GPS receivers. *Int. J. Climatol.* 22: 615-621.
- colorfoto. (2016). Obtido em 17 de agosto de 2015, de colorfoto: <http://www.colorfoto.pt/>
- EIA. (2016). *International Energy Outlook 2016*. Obtido em 12 de julho de 2016, de Energy Information Administration : <http://www.eia.gov/>
- EU. (2016). *Climate Action: 2020 climate & energy package*. Obtido em 12 de julho de 2016, de European Comission: [http://ec.europa.eu/clima/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/index_en.htm)
- Frazer, G., Fournier, R., Trofymow, J., & Hall, R. (2001). A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, 249-263.
- Gál, T., & Unger, J. (2012). Surface geometry mapping for SVF calculation in urban areas. *Proceeding of 8th Conference on Urban Climate, Dublin*, 168.
- Gál, T., & Unger, J. (2014). A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. *Urban Climate* 10, 594-606.
- Gál, T., Lindberg, F., & Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban client. *Theoret. Appl. Climatol.* 95, 111-123.
- Gal, T., Rzepa, M., Gromek, B., & Unger, J. (2007). Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica, Tomus 40-41*, 17-26.
- GARMIN. (2016). *eTrex 30*. Obtido em 10 de maio de 2016, de GARMIN: <http://www.garmin.com/en-US>
- GPS.GOV. (2013). *GPS.GOV: Selective Availability*. Obtido em 11 de agosto de 2015, de Official U.S. Government Information about the Global Position System (GPS): <http://www.gps.gov/>

- Grimmond, C., Potter, S., Zutter, H., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *Int. J. Climatol.* 21, 903-913.
- Haase, J., Ge, M., Vedel, H., & Calais, E. (2003). Accuracy and variability of GPS tropospheric dealy measurements of water vapor in the Western Mediterranean. *J. Appl. Meterol.*, 1547-1568.
- Hammerle, M., Gál, T., Unger, J., & Matzarakis, A. (2011). Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theoret. Appl. Climatol.* 105, 521-527.
- Holmer, B., Postgard, U., & Eriksson, M. (2001). Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theor. Appl. Climatol.* 68, 33-40.
- In-The-Sky.org. (2016). *Map of Live Satellite Positions*. Obtido em 6 de janeiro de 2016, de In-The-Sky.org: <https://in-the-sky.org/>
- Ivanova, S. (2013). Estimation of background diffuse irrrandiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I - Vertical surfaces. *Solar Energy* 95, 376-391.
- Jin, S., & Komjathy, A. (2010). GNSS Reflectometry and remote sensing: new objectives and results. *Advances in Space Research* 46, 111-117.
- Johnson, G., & Watson, I. (1984). The determination of view-factors in urban canyons. *J. Clim. App. Meteol.*, 329-335.
- Lindberg, F. (2007). Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorol. Appl.* 14, 263-273.
- Lindberg, F., & Holmer, B. (2010). *Sky View Factor Calculator User Manual – Version 1.1*. University of Gothenburg.
- Lindberg., F., & Grimmond, C. (2010). Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models. *Clim. Res.* 42, 177-183.
- Liu, B., & Jordan, R. (1963). The long term avarage performace of flat plate solar energy collectors. *Solar Energy* 7, 53-74.
- Matzarakis, A., & Matuschek, O. (2010). Sky View Factor as a parameter in applied climatology – rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorol. Z.* 20, 39-45.
- MedLibrary.org. (2014). *Azimuthal equidistant projection*. Obtido em 8 de março de 2016, de FDA Approved Medication Information: <http://medlibrary.org/>
- Nguyen, D., & Lehman, B. (2008). An Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Model-Based Reconfiguration Algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, NO 7, 2644-25654.
- Nikon. (2014). *Fisheye Converter FC-E8*. Obtido em 10 de maio de 2016, de Nikon: <http://www.nikon.com/>
- Nikon Corporation . (2014). Obtido em 8 de março de 2016, de Nikon Corporation - NIKKOR. Capture more. Create more: <http://www.nikkor.com/>

- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44, 271-289.
- PORDATA. (2016). *Consumo elétrico em Portugal*. Obtido em 16 de junho de 2016, de Base de Dados Portugal Contemporâneo: <http://www.pordata.pt/>
- PV magazine - Photovoltaic Markets & Technology. (2016). Obtido em 11 de março de 2016, de US Residencial Solar GTM Report: <http://www.pv-magazine.com/news>
- PVGIS. (2012). *Irradiação média anual nos países europeus*. Obtido em 16 de junho de 2016, de Photovoltaic Geographical Information System: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy* 97, 332-341.
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M., Carmo, M. B., Cláudio, A. P., Afonso, A. P., & Ferreira, A. (2015). SOL: Um Modelo Urbano de Radiação Solar e suas Aplicações. *VIII CNCG: Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Ordem dos Engenheiros.
- REN. (2015). *Rede Elétrica Nacional - Dados Técnico 2015*. Lisboa. Obtido de Rede Elétrica Nacional - Dados Técnicos 2015.
- Rzepa, M., & Gromek, B. (2006). Variability of sky view factor in the main street canyon in the center of Łódź. *Preprints Sixth Int. Conf. on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 845-857.
- Solar Pathfinder. (2015). Obtido em 20 de maio de 2015, de Solar Pathfinder: <http://www.solarpathfinder.com/>
- Solmetric. (2015). *SunEye 210 Shade Tool*. Obtido em 20 de maio de 2015, de Solmetric: <http://www.solmetric.com/>
- Steyn, D. (1980). The calculation of view-factors from fisheye-lens photographs: Research note. *J. Atmos. Ocean Sci.*, 18, 254-258.
- The Solar Design Company. (2011). Obtido em 10 de maio de 2015, de The Solar Design Company - PanoramaMaster: <http://www.solardesign.co.uk/>
- Tregenza, P. (1987). Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Res. Technol.* 19, 13-14.
- Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*, vol. 27, 253-264.
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 36, Nos. 1/2/3, 59-80.
- Watson, I., & Johnson, G. (1987). Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *J. Climatol.* 7, 193-197.
- Weier, J., & Herring, D. (2000). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. Obtido em 2 de julho de 2015, de NASA Earth Observatory: <http://earthobservatory.nasa.gov/?eocn=topnav&eoci=logo>

- wiki.naturalfrequency. (1994). *Sun-path: projections*. Obtido em 15 de agosto de 2016, de wiki.naturalfrequency: <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Sun-Path/Projections>
- Wypych, S., & Bokwa, A. (2013). *Climate in cities*. Obtido em 1 de agosto de 2016, de Jagiellonian University, Cracóvia, Polónia: [http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/0,59a8eb73686f7774797065092d097072696e74/2\\_\\_Urban\\_Climate/-\\_What\\_controls\\_it\\_\\_3rk.html](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/0,59a8eb73686f7774797065092d097072696e74/2__Urban_Climate/-_What_controls_it__3rk.html)
- Yoon, K., Yun, G., Jeon, J., & Kim, K. S. (2014). Evaluation of hourly solar radiation on inclined surfaces at Seoul by Photographical Method. *Solar Energy* 100, 203-216.



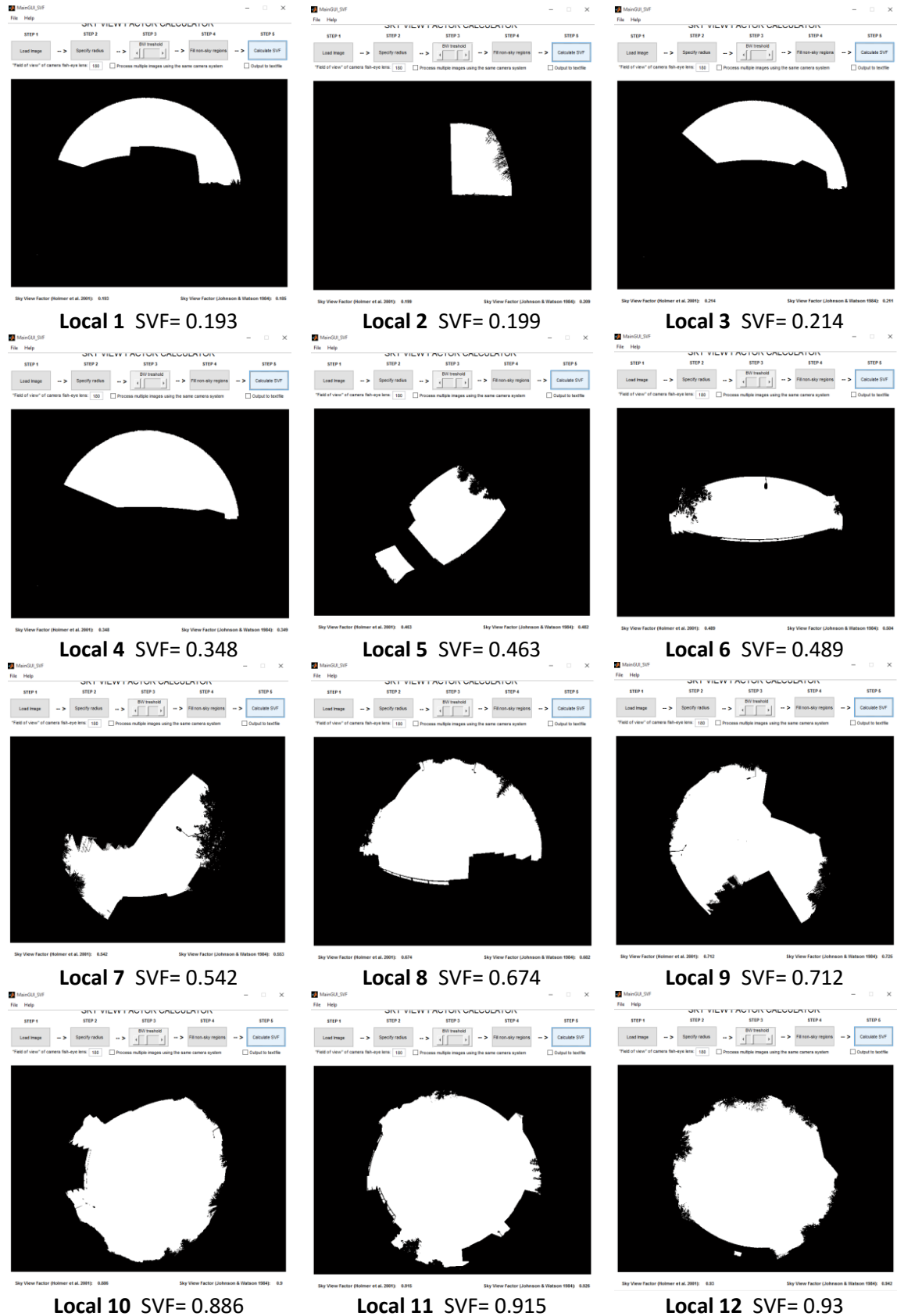
## 7. Anexos

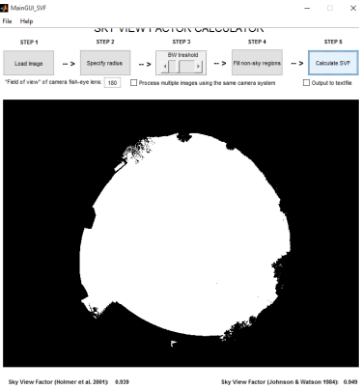
### Anexo A *Features* dos dispositivos portáteis de cálculo de acesso solar

	SunEye210 Shade Tool	Solar Pathfinder	Panorama Master
<b>Captura de imagem</b>	- Câmara digital fisheye incluída	- Necessidade de câmara externa	- Imagem panorâmica após a compilação de fotografias conseguidas com o fixador
<b>Sobreposição de diagrama solar</b>	- Diagrama solar digital em constante ajuste	- Diagrama solar manual específico para determinadas latitudes	- Diagrama solar digital após importação para <i>software</i>
<b>Cálculos permitidos</b>	- Estimativas rápidas de acesso solar, produção, live survey, capacidade de colocar/retirar obstruções e analisar respetivo <i>output</i> - Compatibilidade com PVSyst, PV*SOL ou OnGrid	- Necessidade de importação para <i>software</i> auxiliar	- Necessidade de importação para <i>software</i> auxiliar
<b>Vantagens</b>	- Portabilidade, fácil utilização, preciso	- Rápida perceção do acesso solar, fácil utilização	- Garantia de uma caracterização da envolvente detalhada após importação para <i>software</i>
<b>Desvantagens</b>	- Preço (1968€)	- Difícil de transportar	- Difícil de transportar, <i>software</i> caro (917€)
<b>Fonte</b>	(Solmetric, 2015)	(Solar Pathfinder, 2015)	(The Solar Design Company, 2011)



## Anexo B Screenshots do SkyViewFactorCalculator para os 13 locais analisados





## Anexo C – Locais no campus da FCUL onde as metodologias foram aplicadas



**Local 1** SVF= 0.193



**Local 2** SVF= 0.199



**Local 3** SVF= 0.214



**Local 4** SVF= 0.348



**Local 5** SVF= 0.463



**Local 6** SVF= 0.489



**Local 7** SVF= 0.542



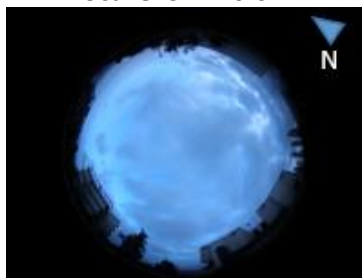
**Local 8** SVF= 0.674



**Local 9** SVF= 0.712



**Local 10** SVF= 0.886



**Local 11** SVF= 0.915



**Local 12** SVF= 0.93



**Local 13** SVF= 0.939

